

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de recherche : Centre de Recherche Rabat Information Technology

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et télécommunications

Présentée et soutenue le 23/01/2021 par :

Bahae ABIDI

Distribution de Traitement dans les Réseaux de Capteurs sans Fils

JURY

Salma MOULINE	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Présidente\Examineur
Mohamed EL HAZITI	PH, Ecole Supérieure de Technologie, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Directeur de thèse
Abdelilah JILBAB	PH, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Encadrant
Mohammed OUMSIS	PES, Ecole Supérieure de Technologie, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Rapporteur\Examineur
Youssef FAKHRI	PES, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Kénitra	Rapporteur\Examineur
Atman JBARI	PH, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Rapporteur\Examineur

Année Universitaire : 2020 - 2021

*À ma grand-mère bien aimée Lhaja Itto,
qui m'a toujours soutenue et encouragée
mais malheureusement elle nous a
quittés avant de savourer le fruit
de tous ses efforts.*

*Tu étais notre exemple,
notre source de bénédiction.
Tu resteras TOUJOURS dans nos mémoires.*

*À ma mère, mon père
À ma tante bien aimée
À mon cher frère : Abdelmoghite
À mes deux soeurs : Oumnia et Manal
Vous m'avez toujours soutenue,
aimée sans conditions,
encouragée à travailler pour réaliser mes rêves.*

*À toute personne ayant
contribué de près ou de loin,
à la réalisation de ce travail.*

*Et enfin,
À tout mon entourage,
sans vous,
ma thèse aurait pu être soutenue bien avant.*



REMERCIEMENTS

Cette thèse de doctorat a été menée dans le cadre de l'obtention du grade de docteur de l'Université Mohammed V. Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT) de la Faculté des Sciences de Rabat (FSR)- Université Mohammed V sous la direction de Monsieur Mohamed El Haziti, encadrement de Monsieur Abdelilah Jilbab, et au Laboratoire des systèmes Intelligent (LSI) à l'Université Carlos 3 de Madrid sous la supervision du Docteur Fernando Garcia Fernandez.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse Monsieur Mohamed EL HAZITI pour sa compréhension, ses efforts et son temps qu'il m'a prodigué pour suivre de près l'évolution de mes recherches.

Mes sincères remerciements vont également à mon encadrant, Monsieur Abdelilah JILBAB pour sa grande disponibilité, son aide précieuse, ses conseils et sa rigueur scientifique ainsi que pour tous ses efforts qu'il a prodigué pour l'accomplissement de ce travail de thèse. J'espère avoir été digne de la confiance qu'il m'a accordée et que ce travail est à la hauteur de ses espérances, je suis très honorée de l'avoir eu comme encadrant.

Je veux exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à Pr. Salma MOULINE, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse et d'examiner mon travail .

Je tiens également à exprimer mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Merci à Pr. Youssef FAKHERI, Professeur d'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Kénitra, d'avoir accepté de rapporter ce travail et pour le temps qu'il a consacré pour lire et évaluer mon travail.

Je souhaite remercier profondément Pr. Mohammed OUMSIS, Professeur d'Enseignement Supérieur à l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé, d'être un rapporteur de ce manuscrit. Je le remercie pour le temps qu'il a consacré pour lire et évaluer mon travail.

Je voudrais également remercier Pr. Atman JBARI, Professeur Habilité à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Rabat, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens aussi à remercier Docteur Fernando Garcia Fernandez, professeur assistant à l'Université Carlos 3 de Madrid et l'un des superviseurs du LSI pour l'opportunité de stage qu'il m'a offert au sein de leur Laboratoire. Sa supervision, ses suggestions utiles et constructives lors de la planification et le développement du travail de mon stage de recherche ainsi que sa volonté de me donner du temps si généreusement a été très appréciée. Merci pour vos conseils pertinents et vos encouragements tout au long de mon stage.

En outre, je tiens à exprimer mes remerciements particuliers à Monsieur Abdulla al-kaff, Docteur Professeur Assistant à l'UC3M et Docteur Ahmed Hussein pour leur soutien continu, leur patience, motivation et leurs vastes connaissances, leurs conseils m'ont aidé et motivé pour donner à chaque fois le meilleur de moi-même et inciter à atteindre mon objectif.

En parallèle, je tiens également à remercier Eng. Irene Cortés Lafuente, Eng. àngel Madridano Carrasco, Eng. Ricardo Alonso Cortizo, Eng. Jorge Beltràn et Eng. Francisco Miguel pour leurs soutiens durant la période de mon stage au sein du LSI à l'UC3M.

Je garde le meilleur pour la fin, ma famille qui a supporté toutes les difficultés morales pour me soutenir au terme de mes études. J'adresse ma profonde gratitude et mon immense reconnaissance à mes raisons d'être, ma mère et mon père, qui m'ont éduquée et orientée. Merci de m'avoir encouragée et soutenue dans mes choix. Nul mot et nulles expressions refléteront le grand amour et la profonde gratitude que je porte pour vous.



TABLE DES MATIÈRES

Liste des abréviations	xi
Liste des figures	xvii
Liste des tableaux	xviii
Liste des algorithmes	xix
Résumé	xxi
Abstract	xxiii
Introduction Générale	1
1 Les Réseaux de Capteurs sans Fil	7
1.1 Introduction	8
1.2 Définition et histoire des RCSF	8
1.3 Architecture d'un RCSF	10
1.4 Caractéristiques et contraintes d'un RCSF	11
1.5 Déploiement des noeuds	12
1.5.1 Déploiement aléatoire	13
1.5.2 Déploiement planifié	13
1.6 Topologie d'un RCSF	13
1.6.1 Topologie physique	14
1.6.2 Topologie logique	16
1.7 Type des RCSF	17
1.7.1 Terrestre	17
1.7.2 Souterrains	18
1.7.3 Sous-marins	18
1.7.4 Multimédia	18
1.7.5 Mobile	19
1.8 Applications des réseaux de capteurs sans fil	19
1.8.1 La domotique	20

1.8.2	Application médicale	20
1.8.3	Application militaire	20
1.8.4	Application dans le domaine des transports intelligents	21
1.8.5	Application agricole	22
1.9	Conclusion	23
2	Distribution de Traitement dans les RCSF	25
2.1	Introduction	26
2.2	Consommation d'énergie dans les RCSF	26
2.2.1	Energie d'acquisition	26
2.2.2	Energie de traitement	27
2.2.3	Energie de communication	27
2.3	Les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	27
2.3.1	Etat du module radio	28
2.3.2	Accès au medium de transmission	29
2.3.3	Modèle de propagation	31
2.3.4	Routage	31
2.4	Technique de Minimisation de la consommation énergétique	31
2.5	Analyse des protocoles de routages dans les RCSF	33
2.5.1	Les critères de performances des protocoles de routage pour les RCSF	33
2.5.2	Le Standard IEEE 802.15.4	34
2.5.3	Les Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil . . .	34
2.6	Conclusion	42
3	Contribution à l'Optimisation de la Consommation énergétique dans les RCSF : Protocole de Routage basé sur le noeud passerelle	43
3.1	Introduction	43
3.2	Le Protocole de Routage Multi-saut proposé	46
3.2.1	Hypothèses	48
3.2.2	Modèle du Système	48
3.2.3	Organigramme de la Méthode Proposée	51
3.3	Expérimentations et Résultats	52
3.3.1	Paramètres Utilisés	52
3.3.2	Résultats des Simulations	53
3.4	Conclusion	55
4	Contribution à l'Optimisation de l'énergie des Réseaux Corporels sans Fils dans le Domaine Médical	57
I	Réseaux Corporels sans fils : état de l'art et défis	59
4.1	Introduction	61
4.2	Réseau Corporel sans Fils	63

4.3	Application des réseaux corporels sans fils	64
4.3.1	Application Médicale	65
4.3.2	Application Non Médicale	68
4.4	Types des réseaux corporels sans fils	69
4.4.1	Les réseaux corporels sans fils manager	69
4.4.2	Les réseaux corporels sans fils autonomes	70
4.4.3	Les réseaux corporels intelligent	70
4.5	Exigences des réseaux corporels sans fils	70
4.6	Caractéristiques des réseaux corporels sans fils	71
4.6.1	Type des noeuds dans les WBANs	71
4.6.2	Nombre des noeuds dans les WBANs	72
4.6.3	Topologie utilisée dans les WBANs	73
4.6.4	Architecture de communications dans les WBANs	74
4.7	Le routage pour les réseaux corporels sans fils	74
4.7.1	Les défis du routage dans les WBANs	75
4.7.2	Classification des protocoles de routage dans les WBANs	77

II Application et Adaptation de notre approche d'optimisation énergétique des RCSF dans le domaine médical 83

4.8	Terminologies utilisées dans notre étude	85
4.9	Vue sur l'ensemble de notre protocole	85
4.9.1	Le modèle adopté par notre système	86
4.9.2	Les étapes adoptées par notre système	86
4.9.3	Modèle énergétique	87
4.9.4	Fonctionnement du protocole : le flux de communication	87
4.10	Simulation et Résultats	89
4.10.1	Paramètres de Simulation	89
4.10.2	Résultats de Simulation	90
4.11	Synthèse	93

III Contribution à l'amélioration de l'approche appliquée au domaine médical 95

4.12	Introduction	97
4.13	Présentation du Problème	97
4.14	Architecture du réseau	98
4.14.1	Protocole de routage basé sur le regroupement pour les réseaux corporels sans fils (CRPBA)	98
4.14.2	Modèle du réseau	99
4.15	Simulation et Résultats	100
4.15.1	Analyse de la durée de vie du réseau	100
4.15.2	Analyse de l'énergie restante	101

4.16 Conclusion	102
5 Proposition d'une Approche Hybride de Communication V2X pour les Systèmes de Transport Intelligent	105
5.1 Introduction	106
5.2 Les systèmes de Transport Intelligent	107
5.2.1 Définition	107
5.2.2 Véhicule autonome connecté	108
5.2.3 Système de communication	110
5.3 Approche de Communication proposée	113
5.3.1 Approche Globale	113
5.3.2 Approche Spécifique	115
5.4 Travail Expérimental	116
5.4.1 Description du Matériel	116
5.4.2 Description du Logiciel	118
5.4.3 Scénario	121
5.4.4 Métrique d'évaluation	123
5.5 Résultats et Discussion	124
5.6 Conclusion	128
Conclusion générale et perspectives	129
 Annexes	 133
A Production scientifique	133
Bibliographie	135



LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACV	<i>Automated and connected vehicles</i>
ALTR	<i>Adaptive Least Temperature Routing</i>
API	<i>Application Programming Interfaces</i>
ATTEMPT	<i>Adaptive Threshold based Thermal Aware Energy efficient Multi-hop protocol</i>
BCU	<i>Body Control Unit</i>
CBBAP	<i>Cluster Based Body Area Protocol</i>
CH	<i>Cluster Head</i>
CICADA	<i>Cascading Information retrieval by Controlling Access with Dynamic slot Assignment</i>
CRPBA	<i>Clustering Routing Protocol for wireless Body Area network</i>
CSIP	<i>Collaborative Signal and Information Processing</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Project Agency</i>
DEEC	<i>Distributed Energy Efficient Clustering schéma</i>
DNA	<i>Deoxyribonucleic Acid</i>
DP	<i>Personnal Device</i>
DSN	<i>Distributed Sensor Network</i>
DVS	<i>Dynamique Voltage Scaling</i>
ECG	<i>Electrocardiogram</i>
EEG	<i>Electro encephalograph</i>
EMG	<i>Electromyograph</i>
E-SEP	<i>Enhanced Stable Election Protocol</i>
ETPA	<i>Energy efficient Thermal and Power Aware Routing Algorithm</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>

4G	<i>Fourth Generation</i>
HIT	<i>Hybrid Indirect Transmission</i>
HPR	<i>Hotspot Preventing Routing</i>
iCab	<i>Intelligent Campus Automobile</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
LEACH	<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
LTR	<i>Least Temperature Routing</i>
LTRT	<i>Least Total Route Temperature</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Adhoc Network</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PS	<i>Personal Server</i>
PSR	<i>Prediction to enable Secure and Reliable</i>
Qos	<i>Quality of service</i>
RAIN	<i>Routing Algorithm for Network of homogeneous and id-less biomedical sensor nodes</i>
RCSF	<i>Réseau de Capteurs sans fil</i>
RL-QRP	<i>Reinforcement Learning based Routing Protocol with Qos support</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SEP	<i>Stable Election Protocol</i>
TARA	<i>Thermal Aware Routing Algorithm</i>
TSHR	<i>Thermal Aware Shortest Hop Routing</i>
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>
UWB	<i>Ultra Wide Bandwidth</i>
VANET	<i>Vehicular Ad-hoc Network</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
VRU	<i>Vulnerable Road Users</i>
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>
V2P	<i>Vehicle to Pedestrian</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle to Everything</i>
WANET	<i>Wireless Adhoc Network</i>

- WATS** *Wide Area Tracking System*
- WASP** *Wireless Autonomous Spanning tree Protocol*
- WAVE** *Wireless Access in Vehicular Environments*
- WBAN** *Wireless Body Area Network*
- WBANP** *Wireless Body Area Network Protocol*
- WHO** *World Health Organization*
- WiFi** *Wireless Fidelity*
- WiFiMAx** *Wireless Fidelity Maximum*
- WiMax** *Worldwide Interoperability for Microwave Access*
- WSN** *Wireless Sensor Network*
- Z-SEP** *Zonal Stable Election Protocol*



LISTE DES FIGURES

1.1	Les différentes unités d'un noeud capteur.	9
1.2	Architecture d'un réseau de capteur sans fil	10
1.3	Les topologies dans les RCSF	13
1.4	Modèle de topologie en étoile	14
1.5	Modèle de topologie en maille ou grille	15
1.6	Modèle de topologie hybride	15
1.7	Modèle de topologie plate	16
1.8	Modèle de topologie hiérarchique	17
1.9	Application Médicale	21
1.10	Application agricole 1	23
1.11	Application agricole 2 : usage des drones équipés des noeuds de capteurs	23
2.1	Modèle de consommation énergétique	28
2.2	Les différents états du module radio du noeud capteur	29
2.3	Modèle en couche pour la communication dans les RCSF	30
2.4	Technique de minimisation de la consommation énergétique	32
2.5	Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	36
3.1	Déploiement des noeuds capteurs	49
3.2	Processus de regroupement	51
3.3	Organigramme de l'algorithme proposé	52
3.4	Durée de vie du réseau (en fonction du premier noeud perdu et du nombre de simulation réalisé)	55
3.5	Nombre des noeuds vivants par itération	56
4.1	Exemple de la surveillance d'un patient	64
4.2	Architecture d'un réseau corporels sans fils conçue pour surveiller un malade	64
4.3	Classification des protocoles de routage pour les réseaux corporels sans fils.	76
4.4	Exemple du protocole HIT	78
4.5	Le modèle du système du protocole CBBAP	78
4.6	WBANP organigramme	89
4.7	Nombre de noeuds perdus par itération	91
4.8	Nombre de noeuds actifs par itération	92

4.9	Energie résiduelle	93
4.10	le modèle considéré pour notre CRPBA	98
4.11	Vue sur l'ensemble de note protocole CRPBA	99
4.12	Analyse de la durée de vie du réseau	101
4.13	Analyse de l'énergie restante	102
5.1	Type des systèmes de communication	111
5.2	Schéma de l'Approche Globale	115
5.3	Matériels utilisé : iCab 2 rouge est une EZ-GO RXV (2008) et iCab-1 bleue EZ- GO RXV (2009)	117
5.4	iCab 1 vue de face et de côté pour les appareils embarqués à bord	117
5.5	Interface graphique de l'utilisateur de L'iCab (GUI)	119
5.6	Architecture logicielle globale de l'iCab	120
5.7	ROS Framework modules	121
5.8	La carte Map de notre environnement de test	122
5.9	Round Trip Time	123
5.10	RTT de l'approche Hybride avec Wifi 39% et 4G 61%	124
5.11	Résultat de la communication V2I [Kokuti et al., 2017]	125
5.12	RTT de l'approche Hybride avec Wifi 15% et 4G 85%	125
5.13	Le chemin du véhicule en commutant les deux types de connexions réseau .	126



LISTE DES TABLEAUX

2.1	Comparaison du Standard 802.15.4 avec d'autres Standard	35
2.2	Comparaison des protocoles de routages des RCSF	42
3.1	Comparaison entre topologie à saut unique et à multi saut.	47
3.2	Paramètres de simulation	53
3.3	La durée de vie du réseau	54
3.4	Durée de vie du réseau en fonction des noeuds vivants	54
4.1	Comparaison entre les WBAN et les RCSF	62
4.2	Capteurs Biomédicaux et leurs fonctions	63
4.3	Classifications des applications des réseaux corporels sans fils	65
4.4	Paramètres de simulation	90
4.5	Paramètres de simulation	100
5.1	Description des modules embarqués sur les iCabs	118
5.2	Calcul du gain énergétique pour une utilisation 4G 61% et Wifi 39% du temps global.	127
5.3	Calcul du gain énergétique pour une utilisation 4G 85% et Wifi 15% du temps global	128



LISTE DES ALGORITHMES

4.1	Flux de Communication	88
5.1	Algorithme Approche Globale	114



RÉSUMÉ

Les dernières avancées des évolutions technologiques ont favorisé l'idée de développer des réseaux de capteurs sans fils. Ces réseaux sont architecturés autour de l'effort collaboratif de plusieurs noeuds opérant d'une façon autonome et communiquant entre eux via des transmissions à courte portée. Ces noeuds intègrent des processeurs embarqués qui leur permettent d'accomplir les opérations de calcul simples et ne transmettre que les données nécessaires partiellement traitées au lieu d'envoyer toutes les informations captées. Leur flexibilité offre une bonne solution pour de nombreux domaines d'application, tels que la domotique, la surveillance, la santé, les systèmes de transport intelligents et dans bien d'autres domaines d'applications. Néanmoins, ce type de réseaux doit faire face à plusieurs défis relevés par les scientifiques, et principalement le fonctionnement à une faible consommation d'énergie, qui constitue l'une des contraintes les plus importantes à respecter pour la conception des protocoles des réseaux de capteurs. Une autre contrainte est liée à la qualité d'informations envoyée par le réseau. La distribution de traitement sur plusieurs noeuds peut être une solution pour améliorer les deux contraintes. Dans la première partie de cette thèse nous nous focalisons sur la conception d'un protocole de routage visant à optimiser la consommation énergétique en se basant sur le concept du noeud passerelle. En s'appuyant sur nos expérimentations, l'approche proposée offre de meilleures performances en termes de durée de vie du réseau et cela grâce au noeud passerelle utilisé pour transmettre les données à leur destination finale qui est la station de base. Puis, nous nous sommes concentrés dans la suite de notre thèse sur deux domaines d'applications des RCSF, le domaine médical et le domaine des systèmes de transport intelligents. Donc, afin de tester encore plus l'efficacité de notre approche générale d'optimisation énergétique proposée précédemment, nous l'avons conçue pour qu'elle soit applicable et qu'elle puisse répondre aux exigences du domaine médical. L'application dans un contexte médical exige une attention particulière car l'état du patient est primordial et toute erreur de traitement issue des capteurs peut être néfaste. Nous avons proposé une application réelle qui a pour but de transmettre un certain type de mesures selon l'état du patient et ses exigences. Nos protocoles de routage proposés, d'après les simulations, ont assuré une optimisation robuste de la consommation énergétique ce qui aide à augmenter la stabilité du réseau ainsi que sa durée de vie. Vue l'attention particulière des véhicules intelligents au sein de la société des systèmes de transport intelligents, la dernière partie de cette thèse concerne

la proposition d'une approche hybride de communication V2X. Nous avons proposé la commutation entre les technologies Wifi et 4G, afin de fournir un moyen efficace pour maintenir tous type de communication véhiculaire (V2V, V2I et V2P) sur la route. L'idée d'utiliser différentes façons de se connecter au réseau en fonction de la disponibilité et des configurations pré-réglées vise à réduire la consommation énergétique de notre système et d'améliorer la qualité d'information en optant pour une connexion stable tout le temps indépendamment de l'endroit. Notre approche a été validée expérimentalement sur l'iCab qui est une voiture de golf autonome et électrique, les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de notre approche de communication qui a un impact positif surtout côté énergétique.



ABSTRACT

The last revolutionary advances in technological developments contributed to the development of wireless sensor networks. These networks are architected around the collaborative effort of several nodes operating autonomously and communicating with each other via short range transmissions. These nodes integrate embedded processes that allow them to perform simple computation operation and transmit only the partially treated necessary data instead of sending all the captured information. Their potential flexibility makes them a good solution for a huge diversity of applications such as home automation, health care services, environment monitoring, military domain, intelligent transportation systems, ... Nevertheless, this type of network has to face several challenges identified by the scientific community, mainly the operation with a low energy consumption, which constitutes one of the most important constraints to be respected for the design of the networks sensors protocols. Another constraint relates to the quality of information sent by the network. Multi-node processing distribution can be a solution to improve both constraints.

In the first part of this thesis, we focus on the conception of a routing protocol to optimize energy consumption based on the gateway node concept. Based on our experiments, the proposed approach offers better performance in terms of network lifetime, due to the use of the gateway node to transmit data to their final destination, which is the base station. Then, in the next part of our thesis, we concentrated on two applications domains of WSN. The medical and intelligent transportation systems fields. So in order to further test the effectiveness of our previously general approach proposed for energy optimization, we have designed it, to be applicable and respond to medical field requirements. The application in the medical context requires special attention because the patient's condition is essential and any processing error can be harmful. We have proposed a real application that aims to transmit a certain type of measurement according to the patient's condition and these requirements. Our proposed routing protocols, based on the simulations, have ensured robust optimization of energy consumption which helps to increase network stability and lifetime.

According to the special attention of intelligent vehicles within the intelligent transportation systems company. The last part of this thesis concerns the proposition of a

hybrid V2X communication approach which switches between the use of Wifi and 4G technologies, in order to provide an efficient way to maintain all types of vehicular communication (V2V, V2I and V2P) on the road using different ways to connect to the network based on the availability and preset configurations aimed to reduce the energy consumption of our system and improve the quality of information by opting for a stable connection all the time regardless of the place. Our approach has been validated by experiments on the iCab which is an autonomous and electric golf car, the obtained results have proved the effectiveness of our communication approach which has a positive impact, especially on the energy side.

Contexte général

Les dernières révolutions dans les domaines de la micro-électronique et des micro processeurs ont permis le développement de nouveau capteur, communément appelés micro-capteurs, qui ont favorisé l'idée de développer des réseaux de capteurs facilitant l'interférence entre l'être humain et son environnement. Ces réseaux de capteurs sans fil (RCSF), en anglais Wireless sensor network sont architecturés autour de l'effort collaboratif de plusieurs noeuds opérant de façon autonome et communiquant entre eux via des transmissions à courte portée sans aucune intervention humaine. L'objectif de ces noeuds de capteurs est de récupérer les grandeurs physiques à partir de l'environnement où ils sont déployés, de les traiter et de les envoyer à leur destination finale. La diminution de la taille et du coût des micro-capteurs ainsi que l'élargissement de la gamme et les types de capteurs disponibles plus l'évolution des supports de communications sans fil ont élargi les champs d'application des réseaux de capteurs sans fil, qu'on les trouve dans divers domaines tel que la surveillance médicale, l'agriculture, le contrôle de pollution, la détection d'intrusion, la découverte de catastrophe naturelle, *etc.*

La diversité de ces technologies a permis d'améliorer la qualité de vie de l'être humain, vu qu'ils sont déployés facilement dans des situations dangereuses et critiques en restant en constante interaction avec l'environnement surveillé, leur auto configuration ainsi que la possibilité de distribution sur une vaste zone. Cependant, les RCSF présentent quelques contraintes qui résident principalement dans le fait des limitations de ressources en termes d'énergie, de communication et de calculs. En effet, la contrainte liée à l'énergie est considérée comme un problème majeur, puisque les noeuds de capteurs qui constituent les RCSF sont de petite taille dans la majorité des cas ; ils sont déployés dans des environnements hostiles et ayant des batteries dont leur durée de vie est limitée, donc il n'est pas pratique de les remplacer ou recharger ce qui implique que la durée de vie du réseau dépend en premier lieu de celle de la batterie.

Ainsi, le problème énergétique est un véritable défi qui a motivé les chercheurs pour la

maximisation de la durée de vie du réseau et la minimisation de la consommation énergétique. La plupart des solutions qui ont été proposées par les chercheurs dans la littérature, repose sur le fait qu'une large partie de l'énergie est consommée lors des communications entre les noeuds et la station de base, donc les transmissions fréquentes et de longue distance doivent être réduites au maximum afin de pouvoir minimiser l'énergie consommée et prolonger la durée de vie du réseau, tout en acheminant l'information d'une manière efficiente. Ces solutions reposent sur l'étude de la mobilité du réseau, la proposition de nouvelle topologie ainsi que de nouveaux algorithmes de routage.

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux problèmes de l'énergie dans les RCSF en essayant de concevoir des protocoles de routage qui ont pour but de minimiser la consommation énergétique et maximiser la durée de vie de notre réseau. Notre objectif sera étudié la distribution de traitement dans les réseaux de capteurs sans fil tout en acheminant les paquets de leur source à leur destination d'une manière plus fiable afin de garantir la prolongation de la vie du réseau ainsi que la qualité d'information.

Problématique

L'amélioration de la qualité de vie au cours de ces dernières années, a permis la conception de nouvelles technologies plus efficace et plus robuste, tel que les RCSF, par la conception de nouveaux prototypes de capteurs et de nouveaux algorithmes de routage ; mais ils ont toujours quelques limites, surtout au niveau de la durée de vie du réseau.

En effet, la consommation énergétique présente un grand défi, les communications doivent être bien organisées dans le réseau afin de prouver son efficacité et minimiser sa consommation énergétique. Les chercheurs se sont donc intéressés à deux aspects dans leurs travaux : le routage et la topologie. Dans cette thèse notre première contribution se base sur la conception d'un algorithme multi saut, multi hop en anglais ; cet algorithme offre une efficacité au niveau énergétique ainsi qu'une augmentation au niveau de la durée de vie du réseau. Afin de réduire le nombre de transaction dans le réseau, nous nous sommes basés sur l'utilisation du noeud passerelles et du regroupement, gateway et clustering respectivement en anglais. Le choix de la topologie qui est basé sur l'utilisation du multi saut a approuvé sa fiabilité et son efficacité en réduisant le nombre total de transmission, ce qui a permis d'augmenter la durée de vie du réseau et minimiser la consommation énergétique.

Grâce au progrès des réseaux sans fil, de nouvelles applications sont conçues dans différents domaines, notre travail c'est par la suite dirigé vers l'utilisation de notre approche dans le domaine médical vu qu'il est devenue l'objet de discussion dans la communauté des chercheurs en informatique. Le suivi des patients en général, les personnes âgées en

particulier est l'une des applications de notre méthode. L'utilisation d'un RCSF permet d'éviter le déplacement des patients à chaque fois aux centres médicaux ; en effet, le patient portant des capteurs qui surveillent ses signes vitaux en temps réel est suivi en permanence et à distance ; cela permettra d'améliorer la qualité des soins et de réduire les déplacements des patients.

Vu, que ce travail de thèse s'inscrit dans une volonté d'approfondir nos connaissances et approfondir les recherches en explorant de nouveau domaine d'application et en traitant les problématiques, nous nous sommes intéressés par la suite à la qualité d'information envoyé dans le réseau, mais cette fois avec les systèmes de transport intelligent, intelligent transportation systems (ITS), plus précisément Automated and connected vehicles (ACV).

Contribution

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Notre étude vise à concevoir des protocoles de routage minimisant la consommation d'énergie pour garantir de maximiser la durée de vie de notre réseau avec une fiabilité de l'information acheminée. Pour cela les contributions de cette thèse portent sur différents axes de recherche, hormis l'introduction générale, la suite de ce mémoire est organisée en cinq chapitres.

Le chapitre 1 est consacré à la description des réseaux de capteurs sans fil, leur histoire et architecture. Nous abordons également les caractéristiques et contraintes liées aux RCSF. Nous nous intéressons aussi à présenter la différence entre la topologie physique et logique, puis abordons le déploiement des capteurs avant d'entamer les différents types des RCSF et leurs domaines d'applications.

Le chapitre 2 est consacré quant à lui à la distribution de traitement dans les RCSF. Nous commençons par décrire les principales raisons de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, ensuite, nous introduisons les facteurs intervenant à cette consommation énergétique. Puis nous détaillons le modèle de propagation et de routage ainsi que les techniques de minimisation de la consommation énergétique. Vers la fin de ce chapitre, nous nous intéressons à l'analyse des différents protocoles de routage existants dans la littérature pour les RCSF.

Au niveau du **chapitre 3**, nous décrivons la première approche proposée. Cette dernière vise à optimiser la consommation énergétique dans les RCSF par la proposition d'un protocole de routage hiérarchique basé sur le regroupement dénoté multi hop routing protocol. Ce protocole exécute dans une première étape un processus d'élection du noeud

passerelle qui va s'occuper d'acheminer les données à la station de base, suivi d'un processus de regroupement afin d'élire le chef de groupe et établir dans une troisième étape les chemins de routage entre les chefs de groupe élus et les noeuds passerelles, puis fini par l'acheminement des données des noeuds passerelles vers leur destination finale qui est la station de base. Les communications inter cluster et intra cluster se basent sur deux paramètres, la distance et l'énergie résiduelle. Chaque chef de groupe utilise la distance comme critère majeur pour former le plus court chemin entre lui-même et son noeud passerelle approprié afin d'optimiser la consommation énergétique. Pour le deuxième paramètre qui est l'énergie, chaque noeud n'est élu chef de groupe ou noeud passerelle que si son énergie résiduelle est suffisante.

Dans **le chapitre 4**, nous nous focalisons sur le domaine médical, qui constitue une très bonne infrastructure pour la transmission des données et représente de nombreuses contraintes en termes de consommation énergétique et durée de vie du réseau. Au début de ce chapitre nous donnons une vue globale sur les réseaux utilisés dans ce domaine. Puis nous poursuivons notre chapitre par l'introduction des terminologies utilisées lors de la conception de nos deux protocoles de routages conçue pour les réseaux corporels sans fil qui représente l'application des RCSF dans le domaine médical et qui ont pour objectif de surveiller l'état de santé des patients pour faciliter leur vie quotidienne. Lors de la conception de nos protocoles, on s'est basé sur l'utilisation du concept du noeud passerelles qui a comme rôle de router les données à leur destination finale, en prenant en considération l'exigence d'une faible consommation énergétique ainsi qu'une bonne qualité des informations envoyées sur le réseau. En réalisant nos expérimentations, nous avons déduit que nos protocoles de routage assurent une bonne optimisation de la consommation énergétique ce qui aide à augmenter la stabilité du réseau ainsi que sa durée de vie.

Dans **le chapitre 5**, nous avons opté à appliquer nos méthodes aux systèmes de transport intelligent utilisant un réseau de capteurs sans fil. Nous nous sommes intéressés à concevoir une approche hybride qui vise à répondre aux deux contraintes majeures lors de la distribution de traitement dans un réseau de capteurs sans fil : garantir la qualité d'information envoyée dans le système ainsi que l'augmentation de la durée de vie du réseau. Nous commençons, ce chapitre, par introduire les systèmes de transport intelligent, les différents types de communications véhiculaires, suivie par notre approche hybride et les outils utilisés pour sa conception et réalisation. Notre approche hybride de communication V2X proposée commute entre l'utilisation des technologies Wifi et 4G. Notre objectif est de fournir un moyen efficace pour maintenir tous types de communications véhiculaires sur la route en utilisant différentes façons de se connecter au réseau selon la disponibilité et les configurations existante qui vise à répondre à nos contraintes. Puis nous enchainons par la validation de notre approche en réalisant de véritables expériences sur l'iCab qui est une voiture de golf électrique et autonome.

Enfin, pour clôturer ce mémoire de thèse, une conclusion générale présente et rappelle les différentes contributions réalisées tout au long de ce travail, ainsi que quelques perspectives et améliorations qui peuvent être une suite logique des travaux présentés au niveau de ce mémoire. Quant à l'annexe A, elle liste la production scientifique résultante de l'ensemble des travaux de thèse réalisés.

LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL**Sommaire**

1.1	Introduction	8
1.2	Définition et histoire des RCSF	8
1.3	Architecture d'un RCSF	10
1.4	Caractéristiques et contraintes d'un RCSF	11
1.5	Déploiement des noeuds	12
1.5.1	Déploiement aléatoire	13
1.5.2	Déploiement planifié	13
1.6	Topologie d'un RCSF	13
1.6.1	Topologie physique	14
1.6.2	Topologie logique	16
1.7	Type des RCSF	17
1.7.1	Terrestre	17
1.7.2	Souterrains	18
1.7.3	Sous-marins	18
1.7.4	Multimédia	18
1.7.5	Mobile	19
1.8	Applications des réseaux de capteurs sans fil	19
1.8.1	La domotique	20
1.8.2	Application médicale	20
1.8.3	Application militaire	20
1.8.4	Application dans le domaine des transports intelligents	21
1.8.5	Application agricole	22
1.9	Conclusion	23

1.1 Introduction

La révolution de ces dernières années en microélectronique et microprocesseurs a donné naissance à de nouveaux réseaux appelé réseau de capteurs sans fil (RCSF) en anglais Wireless Sensor Network, ces capteurs sont de plus en plus performants, de plus en plus petits et avec des autonomies énergétiques de plus en plus importantes.

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de dispositif de petite taille et à faible coût appelé noeuds de capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers, qui sont dispersés d'une manière aléatoire ou déterminée dans une zone géographique et opérant d'une manière autonome afin d'intervenir en cas de besoin en envoyant les données rassemblées à leur destination via une connexion sans fil. Afin d'assurer un acheminement fiable des données, plusieurs protocoles de routage ont été implémentés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles de routage sont créés pour réduire les pertes énergétiques et permettre les préventions des collisions. Avant d'entamer l'étude détaillée de notre sujet, nous commençons par présenter un aperçu sur un RCSF, son architecture, ses caractéristiques, ses contraintes, et ses topologies. Ensuite, nous expliquons les différents types des RCSF ainsi que leurs applications.

1.2 Définition et histoire des RCSF

Le développement d'un système central, capable de surveiller les événements à distance et en temps réel, pour le bien-être de l'être humain ainsi que la prévention des catastrophes et des accidents, était une idée qui paraissait un rêve pour l'humanité dans les années 90. C'est ce que Kristofer PISTER professeur à l'Université de Californie à Berkeley a intitulé la poussière intelligente (Smart Dust en anglais) [Pister, 1999].

De nos jours, un réseau de capteurs sans fil est l'une des technologies ayant un impact sur notre vie. Les progrès en microélectroniques ont permis d'avoir des capteurs performants et intelligents. D'autres parts, les techniques des réseaux mobiles permettent désormais de s'affranchir des fils et donc de déployer les réseaux de capteurs facilement même dans des endroits ayant un accès difficile. Ce développement a permis de viser de nombreux domaines industriels, écologiques, médicaux, sécurité, *etc.*

Un réseau de capteur sans fil, en anglais : Wireless Sensor Network (WSN), est un ensemble de très petits dispositifs, chaque dispositif contient un ou plusieurs capteurs et organisé autour d'un microcontrôleur que l'on appelle capteur intelligent. Ces capteurs sont capables de mesurer des grandeurs physiques environnementale (pression, température, lumière, *etc.*) et les transmettre à un centre de contrôle *via* une station de base. La diminution de la taille et du coût des micro-capteurs ainsi que l'élargissement de la gamme et les types de capteurs disponibles plus l'évolution des supports de communication sans fil ont permis le fonctionnement de ces capteurs en réseaux. Un noeud capteur est composé de quatre unités de base, Figure 1.1 :

— **Unité d'acquisition** : Cette unité est responsable de la collecte des données,

puis de la conversion du signal analogique en des valeurs numériques. Les données acquises par cette unité sont ensuite traitées par l'unité de traitement.

- **Unité de traitement** : Caractérisée par la simplicité de sa programmation et sa faible consommation d'énergie, elle est composée d'un microprocesseur qui effectue le traitement de donnée et le contrôle du fonctionnement des autres unités du capteur. La qualité des données traitées dépend de la taille des mesures acquises par le noeud de capteurs et celles reçues des noeuds voisins. Des nouveaux algorithmes d'agrégation ont été conçus pour réduire la quantité des données transmises par le noeud de capteur.
- **Unité de communication** : En termes d'énergie, c'est le bloc qui consomme le plus. Cette unité est composée d'un émetteur-récepteur (transceiver en anglais) responsable de la transmission et la réception des données. Cette unité passe par quatre modes : réception, transmission, veille, inactif. En mettant l'émetteur - récepteur en veille, cela réduit la consommation d'énergie, à mentionner que l'énergie nécessaire pour la communication dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur ainsi que le nombre des noeuds intermédiaires qui relaient le message.
- **Bloc d'alimentation** : Chargé de fournir l'énergie à toutes les unités, dotés d'une batterie irremplaçable en général et avec une capacité limitée.

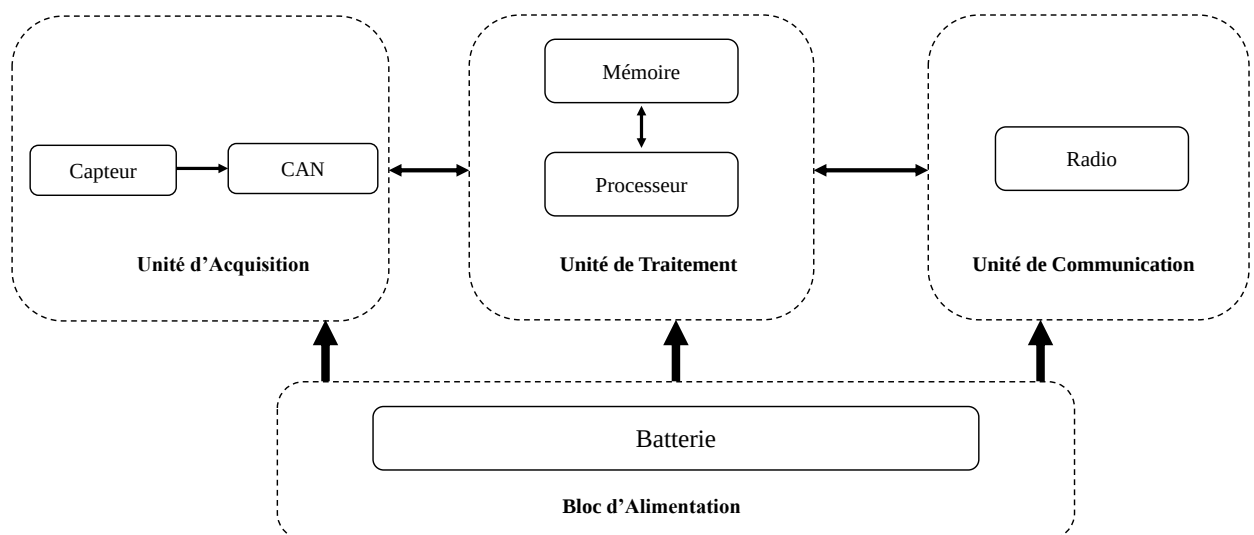


FIGURE 1.1 – Les différentes unités d'un noeud capteur.

1.3 Architecture d'un RCSF

Face aux grands nombres de type de capteurs, différentes données physiques peuvent être mesurées dans plusieurs domaines. Un RCSF est constitué en général d'un ensemble de noeuds capteurs, chacun d'entre eux à la capacité de collecter les données et les transférer à leur destination par l'intermédiaire d'une architecture afin qu'une décision soit tenue en compte après l'analyse de ces données. Malgré la variété entre les noeuds capteurs, une seule architecture les réunit [Parks et al., 2013], [Perera et al., 2014]. Cette architecture est constituée essentiellement des composants suivants : noeuds capteurs, station de base et l'utilisateur.

L'architecture d'un RCSF est présentée sur Figure 1.2, les noeuds capteurs transmettent leurs données vers la station de base. Ces données sont par la suite acheminées à l'utilisateur qui peut être éloigné par l'intermédiaire d'un autre réseau.

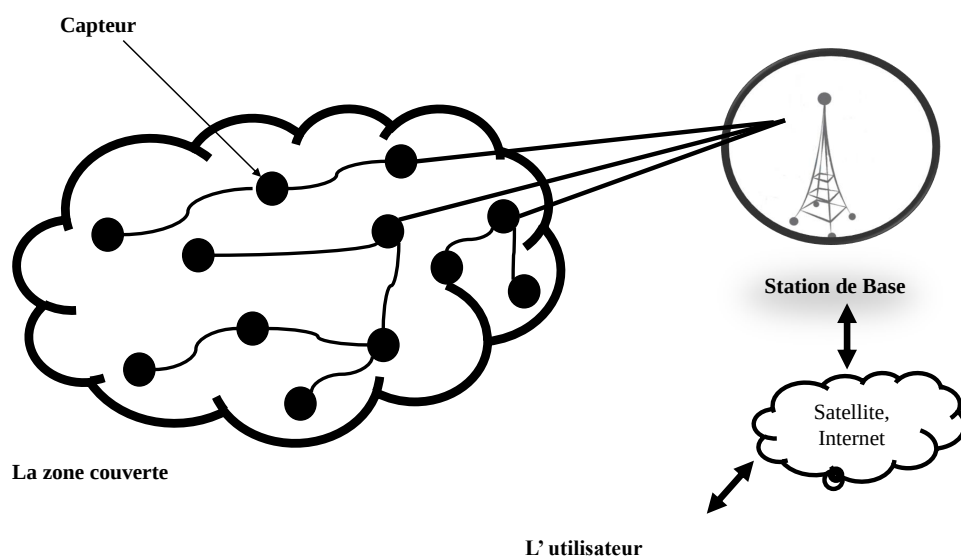


FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil

- **Station de base** : Elle est considérée comme un noeud particulier du réseau avec une énergie illimitée. Elle est chargée de la collecte des données des différents noeuds du réseau. Donc elle est toujours active, à attendre l'arrivée des informations car leurs arrivées sont aléatoires.
- **L'utilisateur** : Considéré comme la destination finale des données, et peut être

aussi considéré comme un centre de traitement des données qui sont collectées et envoyées par la station de base. Il a le rôle de traiter et extraire juste l'information utile et exploitable à partir de toutes les données issues des noeuds. Lorsque le centre est éloigné de la station de base les données peuvent être transféré *via* un réseau étendu comme internet, ce qui permet l'envoi des données en temps réel.

- **Les noeuds de capteurs** : Définie dans la section précédente 1.2.

1.4 Caractéristiques et contraintes d'un RCSF

La réalisation et la conception d'un RCSF est influencée par plusieurs caractéristiques et contraintes. Elles servent comme un guide pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF. Les caractéristiques et contraintes majeurs peuvent être résumées comme suit [Akyildiz et al., 2002b] :

- **Durée de vie limitée** : les noeuds capteurs sont généralement alimentés par une petite batterie difficile ou même impossible à changer ou charger lorsque les noeuds capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Donc la durée de vie d'un RCSF dépend des batteries des noeuds capteurs. Le management énergétique joue un rôle important dans ce genre de réseau vu que le manque des sources énergétiques limite la durée de vie du réseau. Cette caractéristique constitue la contrainte la plus importante à laquelle les protocoles de communications doivent faire face.
- **Auto configuration et auto organisation** : Les noeuds capteurs sont déployés aléatoirement ou manuellement dans les zones à surveiller [Akyildiz et al., 2002a]. Une fois déployé, ces noeuds capteurs peuvent être configurés automatiquement. En outre, ils ont la capacité de s'organiser de manière autonome et de reconfigurer leur connectivité en cas de changement de topologie ou de défaillances [Karl and Willig, 2003] afin d'accomplir leurs différentes tâches en collaborant ensemble au sein du réseau.
- **Faible capacité de stockage et traitement** : Cette limitation est due à deux contraintes, la faible consommation énergétique et le faible coût des noeuds capteurs, normalement les grandes applications doivent contenir des milliers de noeuds capteurs, mais de sorte que le coût global de fabrication de l'ensemble du réseau doit rester dans une fourchette raisonnable. Par conséquent, réduire le coût des noeuds capteurs est nécessaire pour l'ensemble du réseau. Deuxièmement, la contrainte énergétique est limitée, du fait qu'ils sont fabriqués en utilisant des circuits électroniques à faible consommation d'énergie.
- **Facteur d'échelle (Scability)** : Un nombre élevé des noeuds capteurs sont dispersés dans les zones surveillées. Un RCSF peut contenir une dizaine jusqu'à des milliers des noeuds capteurs [Akyildiz et al., 2002a] en raison de leur capacité à collaborer les uns avec les autres et à satisfaire les exigences de chaque application [Nekoogar et al., 2004]. La densité des noeuds change d'une application à une

autre, par exemple pour la surveillance des machines elle peut atteindre 30 noeuds pour 25 m², par contre seulement 10 noeuds par région pour la surveillance de véhicule. Pour la domotique, l'automatisme, l'informatique et télécommunications la densité devrait être entre 20 et 100 noeuds par région. Concernant les applications médicales, la densité est encore plus importante si l'on insère par exemple les capteurs dans le corps humain, les vêtements, les lunettes, *etc.*

- **Fiabilité (Reliability) :** Les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs sans fil doivent fournir des mécanismes de contrôle et de correction d'erreur pour assurer une transmission fiable des données sur les canaux sans fil. En effet, les canaux sont influencés par leur variation dans le temps, par le bruit additif le long du canal de transmission.
- **La tolérance aux pannes :** En raison d'un manque d'énergie ou un défaut matériel, certains noeuds capteurs peuvent devenir dysfonctionnel au cours du cycle de vie du réseau. Ces défaillances ne devraient pas affecter le fonctionnement de l'ensemble du réseau. Ainsi, en cas d'ajout de nouveaux noeuds capteurs, ils devraient être intégrés facilement dans le réseau. Le RCSF devrait avoir la capacité à faire face à cela et continuer à fonctionner sans l'interruption de ses tâches [Akyildiz et al., 2002a]. Les différents environnements de déploiement mettent en place diverses exigences de tolérance aux pannes [Han et al., 2010].
- **La mobilité :** La capacité de soutenir la mobilité et la qualité principale de la communication sans fil. La mobilité dans les réseaux de capteur sans fil peut apparaître sous différentes formes. La mobilité du noeud varie d'une application à une autre, cela dépend du domaine par exemple. La mobilité du noeud n'est pas prise en considération dans le contrôle environnemental, par contre elle occupe une grande partie dans la surveillance, lorsque le noeud est attaché à un animal par exemple, dans ce cas le réseau doit se réorganiser fréquemment afin d'assurer un fonctionnement correct. Le cas spécial de la mobilité du noeud et la mobilité de la station de base, l'aspect dans cette forme est la mobilité d'un récepteur d'information ne faisant pas partie du réseau de capteurs. Puis la mobilité de l'événement qui consiste à détecter un événement, le mouvement d'une voiture par exemple, et de l'observer pendant son déplacement sur un trajet donné. La voiture sera couverte par un nombre suffisant de noeuds afin de la surveiller (mode actif), les noeuds qui ne détectent rien entrent en mode sommeil (mode sleep) à moins qu'ils soient invités à transmettre des informations de la zone.

1.5 Déploiement des noeuds

La performance d'un RCSF est très influencée par le processus de déploiement des noeuds capteurs. Le déploiement dépend principalement du nombre des noeuds requis et la nature de la zone surveillée. Les besoins des applications ont un effet sur la manière dont les noeuds peuvent être déployés sur la zone surveillée. En se basant sur cela, nous

pouvons différencier deux façons de distribution des noeuds dans la zone surveillée :

1.5.1 Déploiement aléatoire

Consiste à disperser les noeuds capteurs d'une manière aléatoire dans la zone surveillée. Il est très utile dans le cas des zones inaccessibles ou hostiles. Les noeuds de capteurs dans ce genre de situation peuvent être projetés par avion en survolant toute la zone surveillée. Ce type de déploiement peut provoquer un problème de manque de surveillance dans certaines zones du réseau vu qu'il ne fournit pas une distribution uniforme, ce qui augmente le problème de couverture.

1.5.2 Déploiement planifié

Dans ce type, on peut mettre chaque noeuds capteurs dans une place spécifique. L'emplacement de chaque noeud est planifié en fonction des tâches qu'il accomplit et son interaction avec ces voisins. La faisabilité de ce genre de modèle dépend de la nature de la région où ces noeuds doivent être disposés. Sachant, que ce genre de modèle peut être irréalisable lorsqu'un nombre élevé de noeuds doit être déployé. L'avantage de ce type est que les noeuds capteurs peuvent être remplacés facilement lorsque leurs batteries sont épuisées afin d'allonger la durée de vie du réseau.

1.6 Topologie d'un RCSF

Le développement des RCSF ainsi que leur déploiement facile ont permis d'aboutir à de nouvelles orientations différentes concernant leur topologie. On distingue deux grandes familles de topologies, Figure 1.3 illustre les différentes topologies existantes.

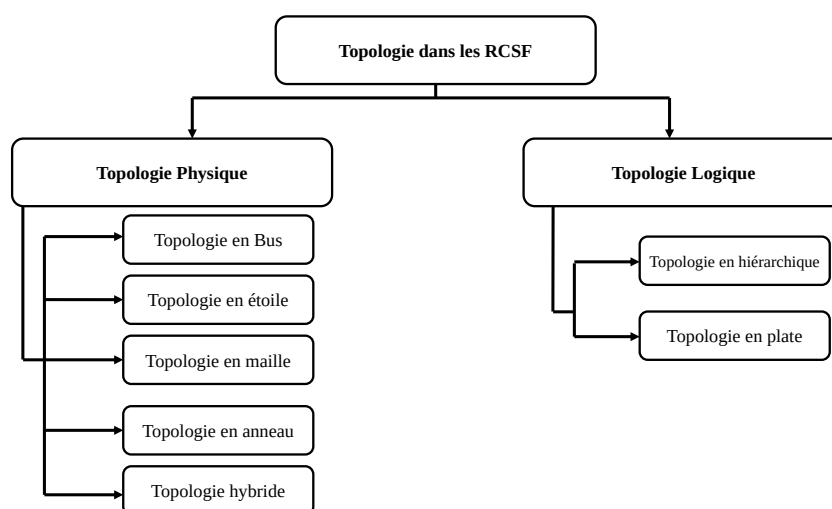


FIGURE 1.3 – Les topologies dans les RCSF

1.6.1 Topologie physique

La topologie physique détermine la structure physique, la forme, l'apparence du réseau. Parmi les topologies physiques qui existe on cite :

1.6.1.1 Topologie en étoile :

Est une topologie de communication uni-saut, où chaque noeud se connecte directement à la station de base. La station de base peut envoyer ou recevoir un message d'un certain nombre de noeuds distants. Dans une topologie en étoile, les noeuds ne sont pas autorisés à envoyer des messages les uns aux autres. L'avantage de cette topologie est qu'elle est simple et permet de maintenir le control et la consommation énergétique des noeuds ; mais son principal défaut : si la station de base tombe en panne plus rien ne fonctionne et toute communication devient impossible. Figure 1.4 montre un prototype d'un réseau en étoile.

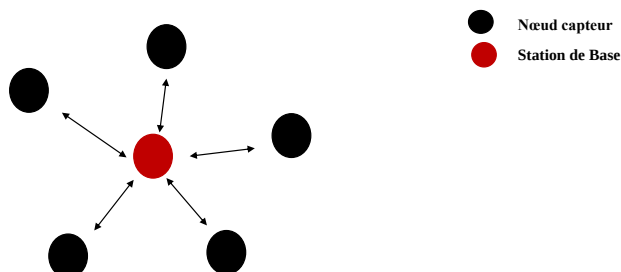


FIGURE 1.4 – Modèle de topologie en étoile

1.6.1.2 Topologie en maille ou grille

Est une infrastructure difficile à mettre en place, dans cette topologie chaque noeud est relié à tous les autres noeuds afin d'éviter le risque de panne si un noeud ne fonctionne plus Figure 1.5. L'avantage de cette topologie est la détection des défauts dans le réseau, et son inconvénient c'est qu'un grand réseau demande une consommation d'énergie importante et nécessite un énorme investissement.

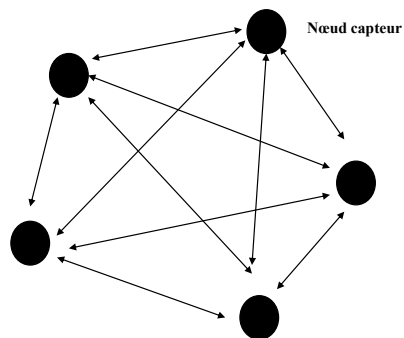


FIGURE 1.5 – Modèle de topologie en maille ou grille

1.6.1.3 Topologie hybride

C'est le regroupement de plusieurs topologie différentes Figure 1.6, afin de minimiser la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs.

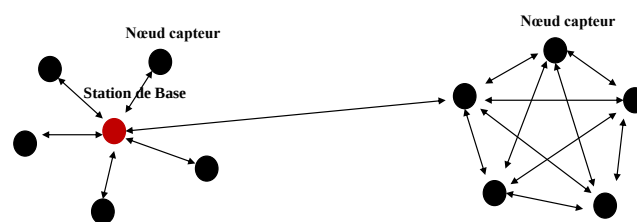


FIGURE 1.6 – Modèle de topologie hybride

1.6.2 Topologie logique

La topologie logique est la structure logique d'une topologie physique, la topologie logique détermine comment se passe la communication, les qualités et performances du réseau, il existe deux principales topologies dans les protocoles de routage pour les RCSF :

1.6.2.1 Topologie plate

Un RCSF à topologie plate est un réseau homogène ayant des noeuds identiques en termes de batterie et ont le même rôle sauf la station de base qui joue le rôle du noeud intermédiaire responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final comme le schématise Figure 1.7. Les noeuds capteurs peuvent communiquer directement avec la station de base ou en mode multi saut selon le service et le type de capteurs. Ce type de topologie souffre d'une faible scalabilité mais permet une grande tolérance aux pannes, si tous les noeuds opèrent de la même façon et d'une manière distribuée, on aura un grand nombre de messages de contrôle nécessaire pour le bon fonctionnement du réseau.

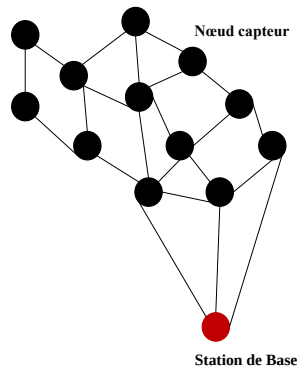


FIGURE 1.7 – Modèle de topologie plate

1.6.2.2 Topologie hiérarchique

Cette topologie a été introduite pour augmenter la scalabilité du réseau, et cela en divisant les noeuds capteurs en plusieurs niveaux de responsabilité. Cette topologie Figure 1.8 consiste à regrouper les noeuds capteurs en groupes appelés clusters qui seront représentés par des ClusterHeads (CHs) responsables de transmettre directement les données à la station de base. Donc il est facile d'intégrer des mécanismes d'agrégation vu que les noeuds

membres transmettent leurs données vers le CH qui va agréger ces informations afin de les acheminer à la station de base.

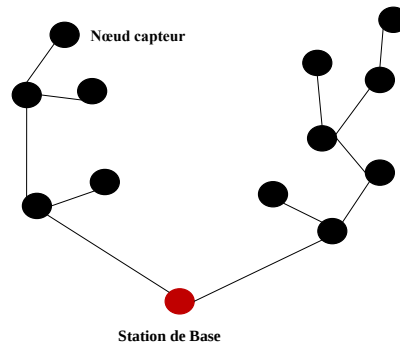


FIGURE 1.8 – Modèle de topologie hiérarchique

1.7 Type des RCSF

Malgré les différentes contraintes et défis qui s’opposent aux réseaux de capteurs, ils ont un large champ d’applications qu’on peut les déployer sur terre ou même sous eau. Les cinq types existants des réseaux de capteurs qu’on détaillera par la suite sont : souterrain, terrestre, sous-marin, mobile et multimédia.

1.7.1 Terrestre

Généralement, les réseaux de capteurs terrestres sont constitués d’une centaine, voire des millions de noeuds capteurs sans fil peu coûteux, qui sont déployés dans une zone donnée et ayant une communication fiable. Les noeuds de capteurs terrestres doivent être capables de garder et d’assurer la qualité des données envoyées vers la station de base [Akyildiz et al., 2002a]. Vu que le problème d’énergie est consistant dans les RCSF, qui ont une énergie de batterie limitée et non rechargeable, ces réseaux de capteurs terrestres peuvent être dotés d’une seconde source d’énergie telle que les cellules solaires. Il existe différentes techniques pour optimiser la conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs terrestres tels que : les courtes transmissions, le routage multi-saut optimal, les techniques d’agrégation de données du réseau, l’élimination des redondances et la réduction des délais.

1.7.2 Souterrains

Utilisé pour surveiller les conditions souterraines, en enterrant un nombre de noeuds capteurs sous terre, ou dans une mine ou grotte. Afin de relayer l'information des noeuds capteurs vers la station de base des noeuds additionnels sont situés au-dessus du sol [Akyildiz and Stuntebeck, 2006]. Pour assurer une communication fiable malgré les contraintes de positionnement des noeuds capteurs, sur le sol, les roches, l'eau etc., ainsi qu'en termes de maintenance, déploiement et équipement, un réseau de capteurs souterrain est plus cher qu'un réseau de capteur terrestre. La communication sans fil est un challenge dans le milieu souterrain en raison des niveaux d'atténuations et le risque de perte du signal, donc la considération du coût et d'énergie ainsi qu'une planification minutieuse est une nécessité pour le déploiement d'un réseau de capteur souterrain [Li and Liu, 2007]. La conception d'un protocole de communication efficace est l'objectif primordial pour conserver l'énergie et augmenter la durée de vie du réseau, vue que les noeuds capteurs souterrains ont une batterie limitée et non rechargeable, difficile à changer une fois déployer dans le terrain.

1.7.3 Sous-marins

Déployé sous l'eau, composé d'un nombre de noeuds capteurs et véhicules. Ces véhicules sous-marins autonomes, utilisés pour l'exploration ou la collecte des informations de noeuds capteurs. Ce type de réseau de capteurs est plus cher et moins déployé que les deux autres types cités précédemment. Les plus grands défis pour la communication sous-marine sont : la bande passante limitée, le temps de propagation qui est long et le fading du signal ; sans oublier les conditions environnementales qui peuvent provoquer des échecs de noeud capteur. La capacité d'une auto configuration est une obligation pour les noeuds capteurs sous-marin ainsi que leur adaptation à l'environnement dur de l'océan. Comme tous les noeuds capteurs, les noeuds capteurs sous-marin sont aussi dotés d'une batterie ayant une énergie limitée et non rechargeable donc la conservation d'énergie s'imposent dans ce type aussi.

1.7.4 Multimédia

Contrairement au réseau de capteurs sous-marins, ce type est composé de noeud capteurs à faible coût, équipé de microphone et caméra pour la surveillance et le suivi des événements dans la forme de multimédia comme l'image, l'audio et vidéo. Ces noeuds capteurs multimédia sont déployé de manière déterminée dans les lieux pour assurer une bonne couverture. Ces noeuds capteurs multimédia sont interconnectés les uns aux autres pour l'acquisition, la restitution, le traitement, la corrélation et la compression des données. La forte consommation énergétique, la qualité de service (quality of service : Qos), les techniques d'acquisition, de traitement et de compression des données et la forte demande de la bande passante sont les majeurs obstacles dans les réseaux de capteurs multimé-

dia. Par exemple les flux vidéo demande une bande passante élevée pour la délivrance du contenu, sachant bien qu'un débit élevé de données cause une consommation énergétique élevée. Pour les noeuds capteurs multimédia, et afin d'améliorer les performances du réseau, les techniques qui prennent en charge une bande passante élevée et une faible consommation énergétique doivent être développées. Les deux variables, capacité du canal et retard rendent la tâche de l'approvisionnement de la qualité de service difficile. Donc il est important qu'un certain seuil de qualité de service soit atteint pour avoir une livraison fiable de contenu. En s'intéressant aux techniques de filtrage, traitement et compression, les performances du réseau peuvent être améliorées en termes des contenus qui fusionnent et de filtrage et d'extraction d'information redondantes.

1.7.5 Mobile

Les noeuds des réseaux de capteurs mobiles ont une capacité de collecter, calculer, communiquer et se déplacer par leurs propres moyens ainsi d'interagir avec l'environnement physique qui leur permet de se différencier des autres noeuds avec la possibilité de s'organiser en réseau. Une autre différence de ce type de réseau concerne la distribution des données dans le routage dynamique, à l'inverse d'un réseau de capteurs statique dans lequel les données peuvent être acheminées à l'aide du routage. Les réseaux de capteurs mobiles commencent par un déploiement initial des noeuds puis les noeuds s'étalent pour recevoir et conserver les données. Puis les données reçues par le noeud mobile peuvent être acheminer à condition que le noeud se trouve à la même portée que l'autre. La couverture, le déploiement, l'auto-organisation, le contrôle, l'énergie, le traitement des données sont les principaux challenges dans un réseau de capteurs mobile. La surveillance en temps réel des produits dangereux, le sauvetage, le suivi, la surveillance environnementale peuvent être inclus parmi les applications de ces réseaux de capteurs mobiles. Concernant par exemple la surveillance environnementale dans les zones sinistrées, un déploiement manuel pourrait ne pas être possible mais avec les noeuds capteurs mobile, la possibilité de se déplacer dans les zones concernées après le déploiement pour fournir la couverture nécessaire. Pour le suivi militaire et la surveillance, en se basant sur la cible, les noeuds capteurs mobiles peuvent collaborer et prendre des décisions. Par rapport aux noeuds capteurs statiques les noeuds capteurs mobile peuvent atteindre un degré plus élevé de couverture et de connectivité.

1.8 Applications des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil est l'une des nouvelles technologies qui bouleversent le monde et notre manière de vivre. Ils répondent à l'émergence lors de ces dernières années, au besoin accru d'observation, diffusion automatique et contrôle des phénomènes physiques et biologiques complexes dans différents domaines tels que l'industrie, l'écologie, la santé, la sécurité ainsi que l'usage militaire.

1.8.1 La domotique

La domotique c'est l'ensemble des techniques de l'informatique, d'automatisme, des télécommunications et de l'électronique déployé dans l'habitation et permettant de contrôler multiples systèmes des bâtiments en apportant des solutions techniques afin de répondre aux besoins de confort, de sécurité et de communication des endroits fréquentés par l'être humain tels que les maisons, les hôtels et même les lieux publics [Gomez and Paradells, 2010], [Wheeler, 2007]. Pour ce type d'application, le réseau de capteurs est déployé dans l'habitation ayant comme règle la formation d'un environnement pour procurer toutes les informations nécessaires aux applications. Les capteurs sont capables de capter la présence de la personne, le son et peuvent même être doté d'une caméra *etc.*, Afin de créer des maisons intelligentes capable de comprendre la situation selon l'attitude des personnes et d'en déduire les actions convenables. Il y'a différents déclencheurs des appareils tel que les détecteurs des mouvements ou des grandeurs physiques, la variation de capacité et de résistance. Ces réseaux doivent être reconfigurables vu que la topologie du réseau peut changer d'un jour à l'autre avec l'aménagement ; on peut aussi changer le type de l'application pendant la vie du réseau.

1.8.2 Application médicale

Avec la miniaturisation des capteurs, il est devenu convenable d'utiliser les RCSFs dans le domaine medical. Appelé Wireless Body Area Network (WBAN) en anglais, il consiste à intégrer un ensemble de capteurs dans le corps humain ou tout simplement en les plaçant sur le corps ou vêtements du patient pour mesurer par exemple la température, la pression, la glycémie, les battements de coeur [Latré et al., 2011], [Li and Yazdandoost, 2010]. Les WBAN sont utilisés pour assurer une surveillance permanente et à temps réel aux patients en évitant leur déplacement chaque fois à l'hôpital, identifier par exemple des allergies, éviter ou réduire la possibilité de prescrire des faux médicaments. Ces réseaux peuvent aussi être utiles coté médecin, en localisant les médecins au sein des grands hôpitaux. Figure 1.9

1.8.3 Application militaire

Concernant le domaine militaire, il est considéré comme un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs, vu qu'ils peuvent être utilisés dans différentes situation telles que la surveillance, la reconnaissance, le suivi, la communication, le contrôle, l'analyse et cela est dû à leurs auto organisation, leurs déploiements faciles ainsi que leurs tolérances aux pannes [Đurišić et al., 2012]. Ils sont caractérisés par leur coût réduit ainsi que leur déploiement facile. En intégrant de petits capteurs dans n'importe quel équipement militaire, les RCSF arrivent à surveiller par exemple la disponibilité des groupes ainsi que leur état, ces petits capteurs transmettront les informations à la base de commandement des armées. Ces RCSF peuvent aussi être déployés dans des zones hostiles

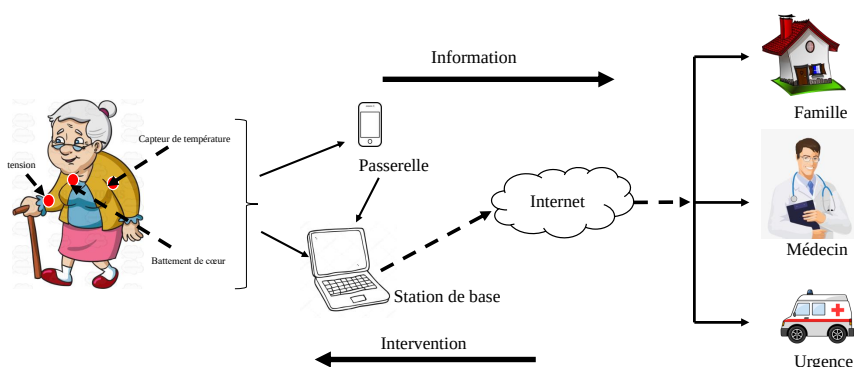


FIGURE 1.9 – Application Médicale

pour surveiller les ennemis, leur mouvement, analyser à quel point il n'y a pas de danger dans les champs de bataille avant d'envoyer les groupes d'armées. Sans oublier que ces RCSF aident les armées à atteindre les cibles voulues avec précision, et cela par leur incorporation dans les systèmes de guidage c'est ce qui est appelé les traques de cibles. Donc grâce aux différentes fonctionnalités des RCSF plusieurs projets ont été lancés afin de faciliter encore plus les tâches des unités militaires. Pour rassembler les données distribuées, DSN (Distributed Sensor Network) est l'un des premiers projets qui datent des années 80 à utiliser les RCSF au DARPA (Defense Advanced Research Project Agency). Les réseaux WATS (Wide Area Tracking System) ont été aussi mis en place pour assurer une surveillance constante des zones, leur objectif est de détecter les dispositifs nucléaires grâce aux détecteurs des rayons gamma et des neutrons.

1.8.4 Application dans le domaine des transports intelligents

La croissance de la mobilité humaine nécessite beaucoup d'attention des chercheurs [Muñoz-Gea et al., 2013], presque 3500 personnes meurent chaque jour sur les routes, et dix millions de personnes sont blessées à cause des accidents de circulation, les enfants, les personnes âgées, les piétons sont parmi les usagers de la route les plus concernés selon l'organisation mondiale de la santé [Organization, 2018]. Les erreurs humaines, telles que les consommations alcooliques au volant, absence de la ceinture, mauvaise visibilité de la route sont considérées les facteurs majeurs influençant sur le taux d'accident. Plusieurs efforts ont été réalisés pour apaiser ces problèmes et en dirigeant les recherches vers les systèmes de transport intelligent, en anglais intelligent transportation system

(ITS). Ces systèmes sont équipés par des capteurs multiples tel que le GPS, 3D Lidar, le capteur encodeur optique, camera, le capteur de proximité *etc.*, pour assurer un guidage automatique, une signalisation routière légère pour les conducteurs, éviter les collisions et les embouteillages. Des chercheurs ont proposé une architecture de RCSF pour fournir les fonctionnalités des ITS, parce que l'utilisation des capteurs tels que le magnétomètre et les tubes de route pneumatique par exemple conduit à des dépenses très élevées surtout pour les grandes villes vues que les infrastructures de communication sont très cher. En outre, les RCSF sont très adaptés pour les besoins des systèmes de transport intelligent en termes de leur auto-organisation, leur adaptation avec le changement de l'environnement ainsi grâce à leur topologie mobile.

1.8.5 Application agricole

Le domaine de l'agriculture a toujours un intérêt considérable de la part des chercheurs vu qu'il produit des aliments et ressources utiles aux quotidiens de notre société, donc chaque réaction doit être bien calculée. Ce qui met en nécessité l'usage des technologies de surveillance pour ces milieux. Les milieux agricoles ont été parmi les premiers domaines qui ont utilisé les nouvelles technologies pour perfectionner la qualité des récoltes. Les chercheurs [Hwang et al., 2010] ont classifié les technologies utilisées dans l'agriculture comme suit, la première est la surveillance par satellite, utilisée pour collecter les informations, cette technologie peut analyser la radiation électro magnétique qui révèle plusieurs informations sur la qualité du sol, le niveau des minéraux dans les collectes agricoles, le niveau d'humidité. La deuxième est les stations météo qui peuvent contrôler des mesures telles que la vitesse du vent, le niveau des pluies, la température et la pression. Par contre ces stations ne sont pas en mesure de détecter l'humidité ou l'acidité qui change d'un point à un autre. Ce manque en technologie procuré à ce domaine, conduit les scientifiques à nouveau de considérer de nouvelle technologie qui combine entre une surveillance efficace mais ayant un faible coût de déploiement. Parmi les solutions les plus appropriées à ce domaine, on trouve les RCSF qui sont en mesure de garantir la collecte d'information et une surveillance immédiate du milieu. Les chercheurs ont présenté un système de surveillance environnemental agricole basé sur les RCSF Figure 1.10 qui collecte les informations tel que l'humidité, la température, la direction et la vitesse du vent, *etc.* . Ces mesures sont converties dans une base de données *via* un serveur afin de produire les données aux agriculteurs. D'autre chercheurs se sont intéressés à la mesure de la température du sol [Hamrita and Hoffacker, 2005] en développant un prototype basé aussi sur les RCSF. On trouve aussi l'utilisation des drones équipés de plusieurs noeuds capteurs qui fournissent des données précieuses et très précises aux agriculteurs Figure 1.11.

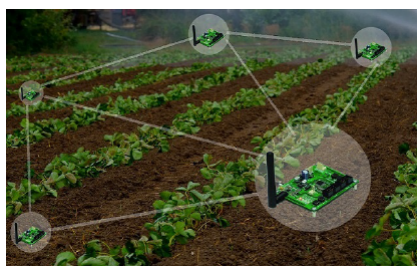


FIGURE 1.10 – Application agricole 1



FIGURE 1.11 – Application agricole 2 : usage des drones équipés des noeuds de capteurs

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'introduire les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons défini les RCSF et leur histoire. Nous avons décrit l'architecture d'un RCSF, nous avons aussi cité quelques caractéristiques et contraintes liées aux RCSFs. Nous avons également présenté et expliqué la différence entre la topologie physique et logique. Puis nous avons abordé le déploiement des capteurs avant d'entamer les différents types des RCSFs. A partir de ces initiations, nous avons conclu que le coût de ces réseaux est réduit; en plus leur auto-organisation, leur tolérance aux pannes, la facilité de leur déploiement sont des caractéristiques majeures à agrandir les champs d'application des RCSFs. Par la suite nous avons abordé quelques domaines d'applications de ces RCSFs.

A travers cela, nous avons pu déduire que la capacité énergétique limitée des RCSFs nécessite une optimisation de la consommation d'énergie dans les différents noeuds afin de pouvoir prolonger la durée de vie du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la contrainte énergétique dans les RCSFs et nous allons répondre aux questions suivantes : quels sont les facteurs intervenant dans la

consommation d'énergie ? Quelles sont les techniques de minimisation de la consommation énergétique ? Et quelles sont les solutions proposées pour augmenter la durée de vie du réseau ? En répondant à ces questions nous allons parvenir à une bonne distribution de traitement dans les réseaux de capteurs sans fils.

DISTRIBUTION DE TRAITEMENT DANS LES RCSF
Sommaire

2.1	Introduction	26
2.2	Consommation d'énergie dans les RCSF	26
2.2.1	Energie d'acquisition	26
2.2.2	Energie de traitement	27
2.2.3	Energie de communication	27
2.3	Les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	27
2.3.1	Etat du module radio	28
2.3.2	Accès au medium de transmission	29
2.3.3	Modèle de propagation	31
2.3.4	Routage	31
2.4	Technique de Minimisation de la consommation énergétique	31
2.5	Analyse des protocoles de routages dans les RCSF	33
2.5.1	Les critères de performances des protocoles de routage pour les RCSF	33
2.5.2	Le Standard IEEE 802.15.4	34
2.5.3	Les Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	34
2.6	Conclusion	42

2.1 Introduction

Un réseau de capteur est caractérisé par l'effort coopératif de chacun de ses noeuds, les noeuds interagissent entre eux, chacun a une tâche précise et ne transmet que les données nécessaires partiellement traitées au lieu d'envoyer toutes les informations captées au noeud principal. L'application des RCSF dans différents domaines, exige le fonctionnement à une faible consommation d'énergie et c'est la contrainte la plus importante à respecter pour prolonger la durée de vie du réseau. Vu que ces noeuds capteurs ne peuvent porter que de petites batteries dont la capacité dépasse rarement quelques joules.

Dans ce chapitre nous allons décrire la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, en abordant les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie, et les techniques existantes pour la minimisation de la consommation d'énergie. Nous allons poursuivre notre chapitre en analysant les protocoles de routages pour les réseaux de capteurs sans fil et cela en énonçant les critères de performances des protocoles de routage, le standard de communication 802.15.4 et finalement nous allons présenter les différents types des protocoles de routage existant pour les réseaux de capteurs sans fil, une brève comparaison de ces protocoles et nous allons conclure ce chapitre par une conclusion.

2.2 Consommation d'énergie dans les RCSF

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de noeuds, dont la position peut être aléatoire ou déterminée dans les zones. Ils effectuent plusieurs opérations qui varie entre la capture des informations, le traitement des données capturées et la communication afin d'acheminer ces informations à leur destination qui est la station de base.

2.2.1 Energie d'acquisition

La capture d'information ou l'acquisition de mesures est la première étape d'un réseau de capteurs sans fil, cela consiste à faire une acquisition à un instant donné par les capteurs approprié dispersé dans le champ de captage. Chaque action effectuée par les capteurs cause une consommation d'énergie. Cette consommation est appelée énergie d'acquisition, cette énergie peut être dissipée pour accomplir différentes tâches au sein du capteur qui varient d'une application à une autre selon le domaine d'application ; on retrouve en général, l'étape d'échantillonnage, de conditionnement, de conversion analogique numérique, et l'étape d'activation de la sonde de capture. En général, cette énergie d'acquisition, en la comparant avec les autres énergies, évoque un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par le noeud.

2.2.2 Energie de traitement

Une fois les données captées par le capteur, il faut les traiter afin de les acheminer à leur destination finale. Ce traitement nécessite une énergie appelée énergie de traitement qui se divise en deux parties. La première est l'énergie de commutation qui est définie par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel. La deuxième est l'énergie de fuite qui correspond à l'énergie consommée lorsqu'il n'y a aucun traitement effectué par l'unité de calcul. Cette énergie est considérée aussi faible en la comparant avec le troisième type d'énergie.

2.2.3 Energie de communication

Afin d'acheminer les informations à leur destination finale, les noeuds capteurs communiquent entre eux en dissipant une énergie de communication qui se présente en trois éléments : énergie de réception, énergie d'émission et énergie en état de veille. Cette énergie dépend de la quantité des données à échanger et de la distance de transmission en plus des propriétés physiques du module radio. L'énergie consommée sera élevée lorsque la puissance d'émission est élevée, et donc le signal aura une grande portée. A mentionner que l'énergie de communication est la plus grande portion de l'énergie consommée par un noeud capteur.

Les chercheurs [Heinzelman et al., 2000] proposent un modèle radio de consommation d'énergie, Figure 2.1, qui représente l'énergie nécessaire pour émettre et recevoir des données. Donc pour émettre un message de n bits vers un récepteur avec une distance d , l'émetteur consomme :

$$E_{Tx}(n, d) = (E_{elec} \times n) + (E_{amp} \times n \times d^2) \quad (2.1)$$

Et pour recevoir un message de n bits le récepteur consomme :

$$E_{Rx}(n) = E_{elec} \times n \quad (2.2)$$

Avec :

- E_{elec} : énergie de transmission électronique.
- E_{amp} : énergie de transmission d'amplification

2.3 Les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci dessous en détails.

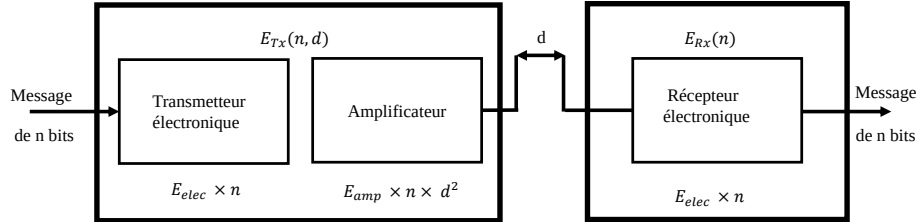


FIGURE 2.1 – Modèle de consommation énergétique

2.3.1 État du module radio

L'acheminement des données de la source jusqu'à leur destination consiste à assurer une communication entre les noeuds du réseau grâce au module radio, Figure 2.2. Celui-ci est considéré parmi les composants qui consomment le plus d'énergie. On peut distinguer 4 modes des composants radio pour l'émetteur et le récepteur : actif, sommeil, réception et transmission.

- **Le mode actif :** Le fait d'être actif au niveau du canal de transmission signifie, que la radio est allumée en mode écoute, mais elle n'est pas utilisée, ce qui veut dire que le noeud capteur n'est ni entrain de transmettre ni de recevoir. Ceci évoque une perte d'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission. Pour éviter cette perte énergétique, le noeud capteur ne doit s'activer qu'en cas de nécessité, et le reste de temps il doit passer en mode sommeil.
- **Le mode sommeil :** C'est lorsque la radio est mise hors tension.
- **Le mode réception :** C'est lorsque la radio reçoit un paquet.
- **Le mode transmission :** C'est lorsque la radio transmet un paquet.

Selon les chercheurs [Hill et al., 2000] la transmission d'un bit consomme plus d'énergie que la réception, donc la plupart des algorithmes ont été proposés [Brayner et al., 2007] pour réduire la consommation énergétique en réduisant le nombre de transition entre les noeuds. De plus la transition entre deux modes peut être aussi considérée comme un facteur majeur de perte d'énergie et cela est dû à l'activation du circuit électronique de commutation.

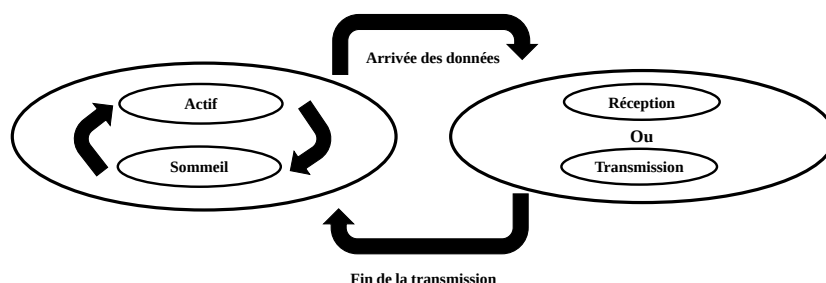


FIGURE 2.2 – Les différents états du module radio du noeud capteur

2.3.2 Accès au medium de transmission

Le modèle de la communication dans les RCSF est inspiré essentiellement du modèle OSI Figure 2.3. Ce modèle comprend cinq couches : la couche application, transport, réseau, liaison de données et physique, et trois plans de gestion : la gestion des tâches, la gestion de mobilité et la gestion d'énergie. Chaque couche du modèle communique avec la couche adjacente et utilise les services des couches inférieurs et en fournit à celle du niveau supérieur. Le but d'un tel système en couche est de séparer le problème en différentes parties selon leur niveau d'abstraction.

Donc selon le modèle en couche, la couche liaison de données permet de spécifier l'envoi des données dans le réseau ; elle est responsable du contrôle d'erreurs, de l'accès au media, du multiplexage des données, sans oublier la liaison point à point et multipoint dans le réseau. Cette couche est composée de 2 sous couches : la sous couche LLC qui a comme rôle le contrôle d'erreur pendant la transmission et la sous couche MAC qui est responsable de la coordination entre les noeuds et la minimisation de la consommation d'énergie. Donc dans ce qui suit nous allons aborder les principales causes de la consommation d'énergie au niveau de la sous couche MAC :

2.3.2.1 La retransmission

Les noeuds capteurs partagent le même canal de transmission et possèdent une seule antenne radio. Lors de l'envoi simultanée des données par plusieurs capteurs, cela peut provoquer de nombreuses pertes d'information transmises dues aux collisions. Donc la retransmission des paquets perdus peut produire des pertes énergétiques.

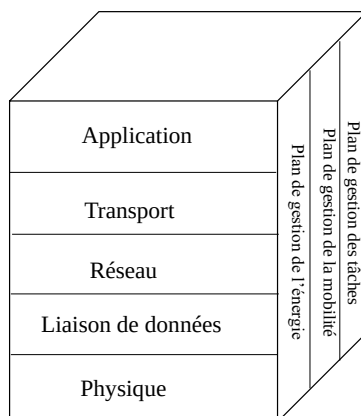


FIGURE 2.3 – Modèle en couche pour la communication dans les RCSF

2.3.2.2 L'écoute Active

Le fait que les noeuds restent dans le mode d'écoute active du canal (idle listening en anglais), dans l'attente de recevoir éventuellement des paquets lors des transmissions, génère une perte importante de la capacité des noeuds en terme d'énergie. Afin d'éviter ce problème, il faut basculer les noeuds en mode sommeil.

2.3.2.3 La surécoute

La surécoute, overhearing en anglais, est un mode où chaque noeud continue à écouter toutes les transmissions de ces voisins sur le canal. Par conséquence, chaque noeud traite beaucoup de paquets qui ne lui sont pas destinés. Il s'agit donc d'un gaspillage important d'énergie.

2.3.2.4 La surcharge

Dans le but de bien assurer la connectivité, l'établissement de plan d'accès, la signalisation et l'évitement de collisions, plusieurs protocoles de la sous couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (overhead en anglais), et tous ces messages exigent une énergie additionnelle.

2.3.2.5 La surémission

Lorsque le noeud capteur envoie des données à un autre noeud qui n'est pas prêt à recevoir ces données, ce phénomène consomme une énergie additionnelle et les messages seront considérés inutiles, cela est appelé la surémission, overmitting en anglais.

2.3.2.6 La taille des paquets

La taille des paquets échangés ne doit être ni trop faible ni trop élevée vue qu'elle a un grand impact sur la consommation des noeuds récepteurs et émetteurs. Car, si elle est grande, une grande énergie est nécessaire pour la transmission et lorsque leur taille est petite, le nombre de paquets d'acquittement générés augmente l'overhead.

2.3.3 Modèle de propagation

L'estimation de la puissance reçue moyenne du signal radio, à une distance donnée d'un émetteur, est appelée modèle de propagation radio. Ce modèle est soumis à différents phénomènes tels que : la dispersion par divers objets, la réflexion et la diffraction. La puissance du signal reçue est généralement de l'ordre $1/d^n$, avec ' d ' la distance entre le récepteur et l'émetteur et ' n ' un exposant de perte d'un chemin, qui est égal à deux dans le vide et il est de 4 à 6 dans un immeuble [Namgoong et al., 2005].

2.3.4 Routage

L'acheminement des données à leur destination dans un réseau est appelé routage, et cela en gardant la fiabilité des données et un coût minimal des ressources énergétiques. Dans un RCSF, le problème qui se pose est un problème d'adaptation selon l'environnement de l'application qui garde comme critère majeur l'adaptation de l'approche du routage avec le grand nombre de noeuds existant sur le réseau et qui possède des capacités énergétiques et mémoire limitées ainsi que des modestes capacités de calcul. Donc lors de la conception d'un protocole de routage on doit prendre en considération l'utilisation optimale des ressources des noeuds (minimisation de la consommation énergétique), la bonne qualité de services, la tolérance aux fautes ainsi que le passage à l'échelle.

2.4 Technique de Minimisation de la consommation énergétique

Vu que la majorité du temps les RCSF sont déployés dans des zones inaccessibles, la consommation d'énergie est un point majeur à traiter puisqu'il est difficile, même impossible, de remplacer les batteries après leur épuisement. Donc la durée de vie du réseau est influencée par la consommation d'énergie des noeuds capteurs. Différentes techniques ont été mises en place pour aider à minimiser cette consommation Figure 2.4. Elles sont appliquées soit au niveau de la communication, soit au niveau du traitement ou même au niveau de l'acquisition comme schématiser sur Figure 2.4. La figure présente les différentes techniques utilisées pour minimiser la consommation énergétique et qui sont appliquées soit au niveau de la couche réseau ou soit au niveau de la couche liaison des données.

1. **Au niveau de l'acquisition** : Le fait de réduire les durées de captures et les fréquences d'échantillonnages est l'une des solutions la plus utilisée pour la minimisation de l'énergie.

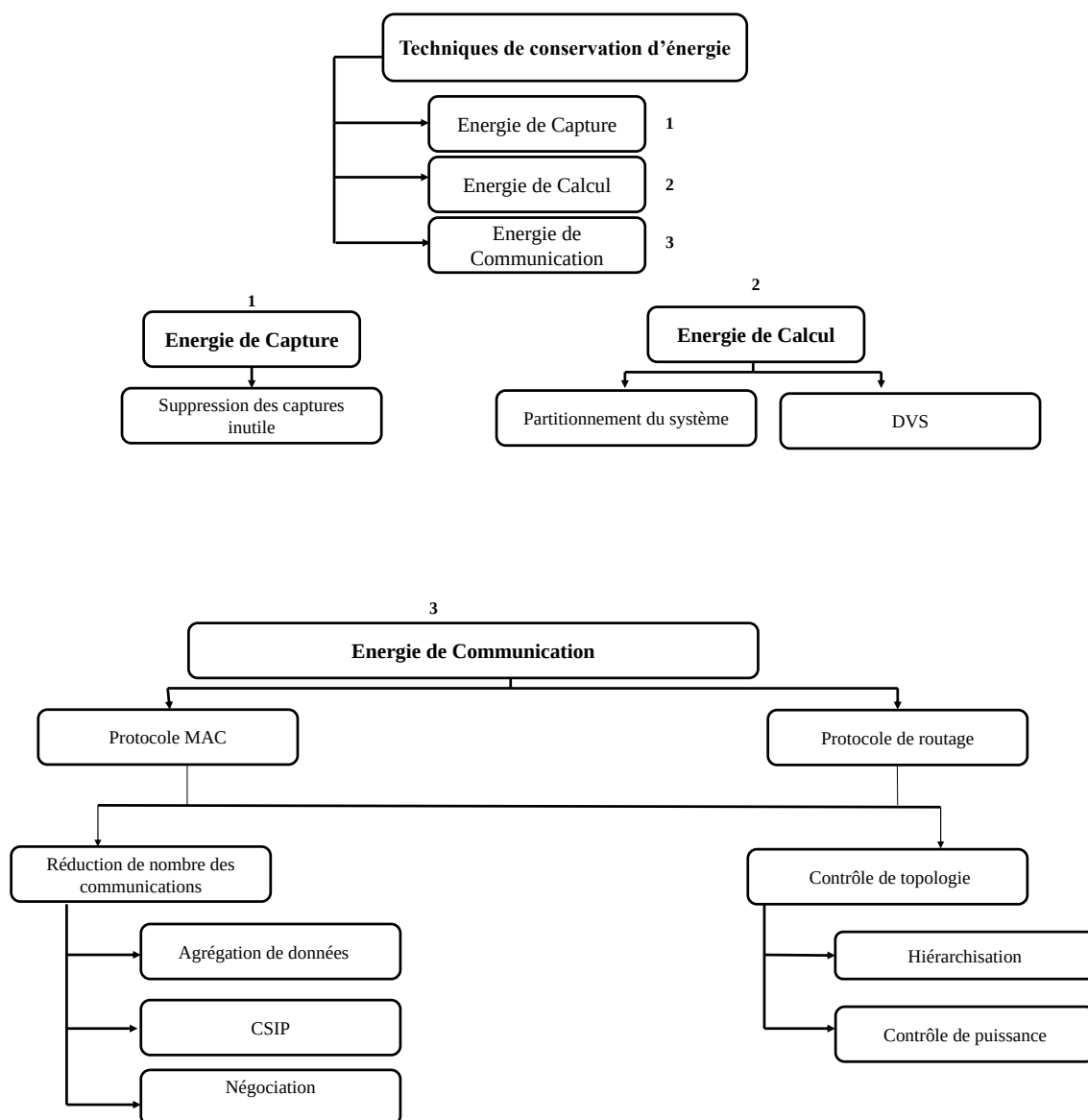


FIGURE 2.4 – Technique de minimisation de la consommation énergétique

2. **Au niveau de calcul** : Deux techniques ont été apportées, l'approche DVS qui est Dynamique Voltage Scaling, elle consiste à économiser la puissance de calcul sans dégradation de performances et cela en ajustant de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur [Ziane and Mellouk, 2005]. Puis la technique du partitionnement du système [Santi, 2005], quant à elle, il s'agit de transférer le calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui possède une grande capacité de calcul et n'a pas de contraintes énergétiques.

3. **Au niveau de la communication** : Minimiser l'énergie est liée aux protocoles développés pour la sous couche MAC et la couche réseau. Les noeuds se basent sur de nombreuses techniques pour contrôler la topologie du réseau et réduire le nombre de communication. On peut citer par exemple l'agrégation des données, la négociation et la technique CSIP abréviation de Collaborative Signal and Information Processing. Celle-ci consiste à combiner plusieurs domaines [Kumar et al., 2002] comme les algorithmes distribués, la théorie de fusion, la communication et le calcul à basse puissance. Ces techniques sont utilisées pour réduire le nombre d'émission et de réception de messages. Le contrôle de topologie [Santi, 2005], quant à lui, permet le regroupement des noeuds capteurs appelé par la hiérarchisation qui consiste à organiser le réseau en structure de plusieurs niveaux. C'est par exemple le cas des algorithmes de regroupement (clustering en anglais), qui forme le réseau en groupes (clusters en anglais) avec des chefs de groupe cluster head (CH) et des noeuds membres [Namgoong et al., 2005]. Ce protocole permet aussi le contrôle de puissance de transmission qui a un effet sur la capacité de charge du trafic ; il est caractérisé par le nombre de paquets transmis avec succès vers une destination, ainsi qu'un effet sur la durée de vie de la batterie du noeud capteurs. Le module de contrôle de puissance est souvent intégré dans les protocoles soit de la couche réseau soit de la sous couche MAC [Narayanaswamy et al., 2002].

2.5 Analyse des protocoles de routages dans les RCSF

2.5.1 Les critères de performances des protocoles de routage pour les RCSF

Avant d'aborder en détails les protocoles de routages des RCSF, il faut savoir que pour concevoir un protocole de routage et évaluer sa robustesse plusieurs critères de performance sont mis en place. Le premier critère important dans les réseaux de capteurs sans fil est l'évolutivité : le réseau n'est pas toujours statique, il change selon les besoins de ces utilisateurs. Donc tous les noeuds du réseau doivent être évolutifs et capables de s'adapter aux changements de la structure du réseau en fonction de son utilisateur. Le deuxième point critique est l'énergie : la détection, le stockage, le traitement et la transmission sont les activités de chaque noeud au sein d'un réseau, et chaque noeud doit être en mesure de savoir l'énergie nécessaire pour effectuer les nouvelles tâches auxquelles il est soumis, sachant que l'énergie consommée varie selon le type de fonctionnalité ou les activités qu'il a à accomplir. Puis on a le temps de traitement qui est le temps nécessaire par le noeud pour accomplir l'ensemble des opérations en commençant par la détection, puis le traitement de données ainsi que le stockage, ensuite la transmission ou la réception sur le réseau. Le quatrième point est le schéma de routage qui est nécessaire pour que les noeuds capteurs acheminent les données de leur source vers leur destination ou station de base, ils se basent sur un schéma de routage multi-saut ou à saut unique.

Le cinquième critère de mesure de performance est la capacité du réseau, pour accomplir les activités telles que la détection ou la transformation ; les noeuds du réseau utilisent certaines ressources du réseau qui les aident. La synchronisation qui est l'avant dernier critère : dans un réseau de capteurs sans fil les capteurs écoutent en permanence les transmissions et consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés les uns les autres lors des communications radio entre les noeuds capteurs. Pour cela, la notion du temps est importante, le noeud doit avoir la même notion de temps pour qu'il arrive à se mettre en synchronisation avec ses voisins, il doit être capable de se mettre en veille et de se réveiller. Pour le dernier critère qui est le contrôle de paquets : il est défini par le paquet envoyé avant la transmission des données. Il contient le nombre de bits des données envoyées, l'adresse du noeud de la destination et certaines informations pour éviter les collisions pendant la transmission.

Dans ce qui suit, nous présenterons un état d'art des protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs. Etant donné que le nombre de ces protocoles est assez grand nous allons essayer de ne citer que quelques-uns. Mais nous allons aborder en premier lieu le standard IEEE 802.15.4 qui définit les propriétés de la couche physique et d'accès au medium (MAC).

2.5.2 Le Standard IEEE 802.15.4

Comme nous avons déjà expliqué que les réseaux de capteurs sans fil font face à plusieurs contraintes, surtout ceux qui sont en relation avec la consommation énergétique : c'est la contrainte clé dans notre thèse. Le 802.15.4 est un protocole de communication défini par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers qui est IEEE, il est destiné aux réseaux sans fil de la famille Low Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN) du fait de leur faible consommation et portée limitée. Il est utilisé par de nombreuses implémentations basées sur des protocoles propriétaires ou sur Internet Protocol (IP) comme par exemple le Zigbee. Le Zigbee est le premier à prendre en compte les nouvelles contraintes liées aux réseaux de capteurs, géré par la Zigbee Alliance, il est fondé sur la base de l'IEEE 802.15.4, afin de pallier au problème de la trop forte consommation d'énergie comme le Bluetooth [blu,]. Le tableau Tableau 2.1 décrit les caractéristiques du Zigbee comparé aux wifi et au Bluetooth.

2.5.3 Les Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Comme nous avons déjà mentionné dans 2.3.4, le routage est l'acheminement des informations de leur source vers la bonne destination dans un réseau. Son objectif consiste à trouver le chemin optimal pour envoyer les paquets au sein du réseau avec un coût énergétique minimum pour garantir la survie maximum du réseau malgré les changements inattendus de sa topologie. Donc pour concevoir un protocole de routage il est important de prendre en considération des points majeurs comme :

TABLE 2.1 – Comparaison du Standard 802.15.4 avec d'autres Standard

Caractéristiques	Zigbee	Bluetooth	Wifi
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11b
Durée de vie	Années	Jours	Heures
Complexité	Faible	Grande	Très grande
Portée	10- 300m	10m	100m
Nombre de noeuds	65000	7	32
Débits	20- 250 Kbits/s	1Mbits/s	11 Mbits/s

- Minimiser de la consommation énergétique pour maximiser la durée de vie du réseau,
- Assurer un routage optimal,
- Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoint fiables,
- Offrir une bonne qualité.

Lors de l'acheminement des informations, et en se basant sur la manière de la création et de la maintenance, les protocoles de routages peuvent être classés selon grands axes : selon la structure du réseau ou selon les opérations du protocole comme schématisé dans Figure 2.5. Dans notre travail nous allons nous baser sur la structure du réseau. Cette dernière contient trois grandes catégories de protocole, les protocoles de routage Data-Centric, les protocoles de routage basés sur la localisation et les protocoles de routage hiérarchiques.

2.5.3.1 Les Protocoles de routage Data-Centric

Avec le grand nombre des noeuds dans les réseaux de capteurs, il est difficile d'affecter à chaque noeud un identificateur global. Le déploiement aléatoire des noeuds capteurs ainsi que l'absence d'identificateur global rendent difficile la sélection d'un ensemble défini ou spécifique des noeuds à interroger. Ce qui cause le problème de redondance lors des transmissions des données à partir des noeuds capteurs dans la région de déploiement. Tout cela a conduit au routage data-centric, ou comme autrement appelé routage plat ; il est différent du routage traditionnel dans lequel les routes sont générées entre les noeuds adressables dans la couche réseau. Les requêtes sont envoyées par le destinataire à certaines régions et attend la réception des données en provenance des capteurs placés dans les régions sélectionnées. Puisque ces données sont demandées par des requêtes, l'identification est nécessaire pour préciser les caractéristiques et propriétés des données [Krishnamachari et al., 2002].

1. Sensor Protocol for Information via Negotiation (SPIN)

C'est le premier protocole de routage plat conçu pour les RCSF [Rehena et al., 2011]. Il a été introduit pour répondre aux différents pro-

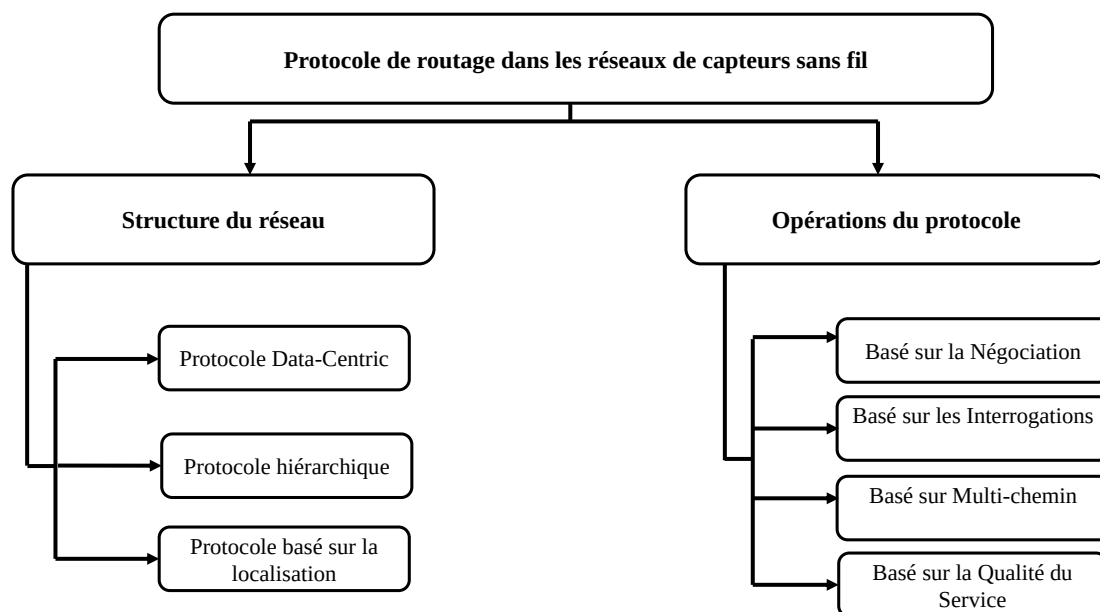


FIGURE 2.5 – Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

blèmes des RCSF lorsqu'ils sont déployés dans différentes régions avec un grand nombre de capteurs. L'accès aux informations pour une zone spécifique peut faire une grande différence ; plusieurs mesures peuvent être prises en considération pour obtenir les données à partir d'un endroit ciblé, et afin de bien gérer les ressources énergétiques : vu que lorsque les données sont recueillies auprès de tous les noeuds capteurs et transmises de manière redondante sur le réseau cela cause une mauvaise gestion énergétique. Le protocole SPIN, par exemple, est efficace pour la réduction des données redondante et conserve l'énergie [Akkaya and Younis, 2005]. Ce protocole utilise trois types de messages : ADV, REQ ET DATA. Le ADV est le message diffusé par un noeud qui contient des informations sur le type des données que leadvertising noeud contient. Les noeuds intéressés, et qui reçoivent le ADV message, envoient un REQ message demandant les données ; ensuite le noeud ayant le message envoie le DATA message aux noeuds intéressés. Après la réception des données, les noeuds envoient un ADV message et ainsi de suite ; le processus continue jusqu'à ce que les données atteignent la station de base. Dans ce protocole, chaque noeud aura un gestionnaire de ressource qui informera le noeud sur les ressources restantes, puis le noeud décidera s'il sera un expéditeur ou non. Les principaux avantages du protocole SPIN sont :

- Réduction des redondances des données car une négociation est effectuée avant le transfert des données
- Réduction de la surcharge du réseau ainsi que l'énergie consommée.

2. Diffusion Directe

C'est un protocole important dans les protocoles de routage plat. L'idée principale vise à diffuser les données aux noeuds en utilisant un schéma de nommage pour les informations. La diffusion est un processus qui consiste en premier lieu à collecter des observations de l'ensemble des noeuds capteurs individuel déployés dans le réseau [Abbas et al., 2008] et où tous les capteurs sont traités comme des noeuds destination. Recueillir le point de vue de l'environnement sous la forme de données ainsi que renforcer la structure de réseau avec une tolérance aux fautes, sont les tâches confiées à ces capteurs. Le but principal pour utiliser un tel fonctionnement dans ce protocole est d'économiser l'énergie, vu que durant les calculs les communications sont contrôlées pour prolonger la durée de vie des capteurs dans le réseau, et cela en éliminant les opérations inutiles de routage. La diffusion directe [Intanagonwiwat et al., 2000] propose l'utilisation du couple attribut-valeur pour les données et les requêtes des capteurs. Donc pour créer une requête, un noeud est défini à l'aide d'une liste d'attribut-valeur, comme par exemple : le nom des objets, la durée, l'intervalle, la zone géographique. Un paquet est diffusé par ce noeud vers la destination à travers ses voisins, et chaque noeud qui empoche les paquets peut les réserver pour une utilisation ultérieure. Ces paquets stockés sont par la suite utilisés pour comparer les données reçues. Ces requêtes contiennent aussi plusieurs champs de gradient, sachant qu'un gradient est le lien de réponse avec un voisin dont le paquet a été reçu, caractérisé par : la date d'expiration de données, le débit et la durée. Donc, avec l'utilisation des gradients et des intérêts, les routes de routage sont établies entre les sources et la destination. Différentes routes peuvent être établies, et l'une d'entre elle est choisie par renforcement. Puis la destination à travers la route choisie, renvoie le message d'intérêt. Un intervalle plus petit renforce donc le noeud source sur ce chemin pour envoyer les données plus fréquemment.

2.5.3.2 Les Protocoles de routage Basés sur la Localisation

Les protocoles de routage basés sur la localisation, ou protocoles de routage géographiques, se basent et utilisent les informations de localisation des noeuds pour avoir un itinéraire efficace de transmission des données vers la destination [Blazevic et al., 2005]. Ce sont des protocoles très appropriés pour les RCSF où l'agrégation des données est une technique très convenable pour minimiser le nombre de transmission vers la station de base en éliminant les redondances entre les paquets. Ils sont très utiles pour les grands réseaux de capteurs à multi-saut dans lesquels les noeuds ne sont pas fiables et leur topologie change fréquemment. Les protocoles de routage basés sur la localisation nécessitent la connaissance des emplacements des autres noeuds. Parmi les avantages de ces protocoles,

qu'ils réduisent le besoin de réaliser des tables de routage et réduisent également le temps du système de contrôle. Il existe différents types des protocoles de routage géographique pour les réseaux de capteurs sans fil, chacun d'entre eux a ses caractéristiques spécifiques.

1. Geographic Adaptive Fidelity (GAF)

C'est un protocole de routage basé sur la localisation des noeuds [Xu et al., 2001]. Il a été conçu normalement pour les réseaux mobiles ad-hoc (ou MANET qui sont capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement et dans lesquels toutes les stations peuvent être mobiles), mais peut être applicable pour les réseaux de capteurs. Pour ce protocole la localisation des noeuds pourrait être fournie à l'aide des techniques de localisation [Doherty et al., 2001], [Shah and Rabaey, 2002]. Le protocole GAF forme des grilles virtuelles de la zone concernée et cela en partitionnant la zone où les noeuds déployés en petites zones, les noeuds de deux petites zones adjacentes peuvent communiquer. Ce système de partitionnement assure la fidélité du routage car il va toujours y avoir un chemin entre un noeud et la station de base et cela aide à augmenter la durée de vie du réseau. Ce protocole adopte trois états pour ses noeuds, état actif lors de la communication, état sommeil pour économiser l'énergie et état de découverte afin de chercher le prochain noeud actif, au moment de la découverte tous les noeuds sont réveillés et transmettent des messages de découverte afin de découvrir le prochain noeud actif d'énergie supérieure. Ce processus dure un temps T_d , après ce temps, le noeud sélectionné entre en état actif, le noeud reste en état actif un temps T_a puis en passe sommeil pendant un temps T_s . Rappelons que le temps T_a doit être supérieur à T_s pour éviter la perte de communication.

2. Geographic and Energy Aware Routing (GEAR)

Ce protocole de routage se base sur les informations géographique [Singh and Raghavendra, 1998]. Il consiste à utiliser ces informations lors de la diffusion des requêtes à leurs cibles, vu que les requêtes contiennent la plupart du temps les données de localisation. Donc l'idée du protocole GEAR est de restreindre le nombre de données dans la diffusion dirigée tout en prenant en considération une certaine région uniquement, plutôt que d'envoyer les données à l'ensemble du réseau. Chaque noeud opérant sous le protocole GEAR maintient le coût pour arriver à sa destination en passant par ses voisins. Ce coût est divisé en deux : coût estimé et coût d'apprentissage. La combinaison de l'énergie résiduelle et la distance jusqu'à destination est le coût estimé. Par contre le coût d'apprentissage est défini comme étant le raffinement du coût estimé qu'un noeud dépense pour le routage autour des trous dans le réseau. A noter que lorsque le noeud n'a pas de voisin proche par lequel il peut atteindre sa région cible un trou se forme. Le coût estimé est égal au coût d'apprentissage lorsqu'il n'y a pas de trou, et à chaque fois qu'un paquet arrive à sa destination le coût d'apprentissage se propage d'un saut [Yu et al., 2001].

3. Minimum Energy Communication Network (MECN)

Ce protocole de routage se base sur la localisation en utilisant des GPS ayant une faible puissance pour établir et entretenir une énergie minimum pour les réseaux sans fil. Comme tous le réseaux de capteurs, ce protocole utilise une station de base pour la destination finale des information [Rodoplu and Meng, 1998]. L'idée principale de ce protocole est de trouver un sous-réseau ayant moins de noeuds et nécessitant moins d'énergie pour la transmission entre deux noeuds quelconques. Cela est réalisé, en utilisant une recherche localisée pour chaque noeud et en prenant sa région de relais en considération.

2.5.3.3 Les Protocoles de routage Hiérarchique

L'auto organisation est la particularité des protocoles de routage hiérarchique, elle permet un large déploiement des noeuds dans le réseau. Dans une architecture hiérarchique, certains noeuds assument la responsabilité d'effectuer les grandes tâches de transmission tandis que les autres exécutent les tâches normales. Les protocoles de routage hiérarchique en se basant sur la gestion de topologie peuvent être classés en deux types :

- Les protocoles de routage hiérarchique basés sur le regroupement : les noeuds sont regroupés en groupe, chaque groupe a un chef appelé cluster head qui est l'un des noeuds et qui agit comme un noeud intermédiaire entre la station de base et les autres noeuds du groupe.
- Les protocoles de routage hiérarchique en chaine : tous les noeuds sont connectés en une structure chaînée, et le noeud avec une grande capacité énergétique est choisi comme le meneur de transmission entre les noeuds normaux et la station de base.

Le but principale des protocoles de routage hiérarchique [Sharma and Jena, 2011] est de bien maintenir la consommation énergétique des noeuds en effectuant différentes opérations comme l'agrégation et la fusion des données pour minimiser le nombre de données transmises à la station de base.

1. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

C'est le protocole de routage hiérarchique le plus populaire dans les réseaux de capteurs sans fil [Aslam et al., 2012]. Proposé pour réduire la consommation énergétique du réseau, il utilise la coordination localisée et la robustesse pour l'évolutivité du réseau et pour avoir un réseau dynamique. Le protocole de routage intègre la fusion de données afin de réduire la quantité d'information transmise à la station de base. L'objectif principale du protocole LEACH est de ne consommé qu'une énergie minimum pour créer et maintenir les groupes (clusters) afin d'améliorer la durée de vie du réseau. Dans ce protocole, la plupart des noeuds transmettent leurs données aux chefs des groupes (cluster head) qui s'occupent de l'agrégation et la compression des données ainsi que la transmission à la station de base. Sachant que chaque noeud, lors de chaque itération, à une probabilité spécifique qui

détermine s'il deviendra chef du groupe lors de cette itération. Sans oublier que la rotation aléatoire des chefs du groupe est considérée parmi les caractéristiques principales du protocole LEACH.

Parmi les principaux avantages du protocole LEACH on peut citer :

- L'évolutivité, en limitant les communications au sein des différents groupes du réseau.
- Le saut unique, des noeuds normaux vers les chefs du groupe.
- La réduction de la quantité du trafic sur le réseau, en utilisant l'agrégation et la fusion par les chefs des groupes pour les informations collectées des autres noeuds normaux.
- L'augmentation de la durée de vie du réseau en trois phases.
- Il n'a pas besoin des informations sur la localisation des noeuds dans le réseau pour créer les groupes.

Mais ce protocole a bien évidemment quelques désavantages comme le fait qu'il ne peut pas être considéré comme un bon choix pour les applications qui nécessitent une grande couverture, il exige un haut niveau de puissance de transmission dans le réseau car il n'utilise pas l'inter-communication pour que les groupes communiquent entre eux dans le réseau.

2. Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)

C'est une version améliorée du protocole LEACH. Un protocole de routage hiérarchique qui forme des chaînes plutôt que des groupes de noeuds de capteurs pour que chaque noeud puisse recevoir et transmettre uniquement les données de son voisin. En ce qui concerne la transmission à la station de base, un seul noeud est sélectionné de la chaîne formée. L'idée principale du protocole PEGASIS est qu'il utilise tous les noeuds pour la transmission et la réception des données de leur plus proche voisin. Les données reçues sont déplacées d'un noeud à un autre puis les données sont agrégées jusqu'à ce qu'elles arrivent à la station de base. Donc chaque noeud du réseau est élu chef de file de la chaîne tour à tour. Le chef est responsable de transmettre les informations rassemblées et fusionnées par la chaîne des noeuds à la station de base [Lindsey and Raghavendra, 2002]. Parmi les points positifs du protocole PEGASIS on peut citer :

- ☐ La technique de collaboration pour augmenter la durée de vie de chaque noeud.
- ☐ Il utilise seulement un seul noeud pour transmettre les données à la station de base.
- ☐ Réduit l'énergie nécessaire pour la transmission des données pour chaque itération puisque les tâches sont réparties uniformément sur tous les noeuds.

Mais d'un autre côté, et ce qui est considéré comme un point faible de ce protocole, c'est qu'il assume que tous les noeuds vont perdre leur énergie au même instant. Le deuxième point négatif, c'est que ce protocole suppose que chaque noeud est apte de communiquer avec la station de base directement.

3. **Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network (TEEN)**

Est un protocole qui convient le mieux aux applications critiques [Manjeshwar and Agrawal, 2001], le facteur clé de ce protocole est la valeur de l'attribut mesuré. Il s'adapte facilement aux changements des attributs tels que la température. L'architecture du réseau se base sur un regroupement hiérarchique où les noeuds forment des groupes, le processus de regroupement va se reproduire jusqu'à ce que la station de base soit atteinte [Akkaya and Younis, 2005]. Parmi les points forts de ce protocole, c'est que le seuil peut varier en fonction de l'application et des données critiques envoyé et un seuil avec une petite valeur peut produire une prospection plus précise ainsi que les données atteignent l'utilisateur instantanément. D'un autre côté, le noeud doit attendre le temps de transmission de donnée (qui est le time slot en anglais) mais ce temps peut être perdu si le noeud n'a pas de donnée à transmettre ce qui influence négativement sur le réseau.

4. **Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (APTEEN)**

C'est une extension du protocole TEEN qui est capable de réagir à la fois aux événements critiques et de collecter les captures périodique des données [Subramanian, 2004]. Quand la station de base forme les groupes, les chefs de groupes diffusent les valeurs des seuils, le calendrier de transmission de tous les noeuds et les attributs. Afin d'économiser l'énergie, le chef de groupe effectue également l'agrégation des données.

5. **HYBRID Energy Distributed clustering (HEED)**

Il sélectionne les chefs de groupe périodiquement en se basant sur deux paramètres : l'énergie résiduel de chaque noeud et la proximité de chaque noeud à ces voisins (appelé le degré du noeud). La combinaison de ces deux paramètres est la base pour sélectionner les chefs des groupes [Zhou et al., 2016]. Le processus de regroupement est effectué au long de plusieurs itérations, et chaque itération est assez longue pour recevoir les données. Ce protocole est plus adéquat pour prolonger la durée de vie du réseau, car même si lorsque les noeuds ne sont pas synchronisés, le protocole opère correctement. Chaque noeud a besoin juste des informations locales pour former les groupes et la distribution d'énergie prolonge la durée de vie du noeud au sein du réseau et aide à la stabilisation des noeuds voisins. Mais d'un autre côté, la sélection aléatoire du chef du groupe adopter dans ce protocole peut causer une forte communication et la rotation périodique du chef du groupe a besoin d'une énergie supplémentaire pour la reconstruction des groupes.

Il existe dans la littérature plusieurs protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil, chacun d'entre eux a ses propres caractéristiques qui font la différence d'un protocole à un autre. En général, ces protocoles essayent de réduire la surcharge du réseau et le

rendre plus rapide. En se basant sur les protocoles étudiés dans cette section, le Tableau suivant résume une comparaison basic des différents protocoles de routage sur la base de quelques facteurs tels que : la mobilité, l'agrégation, la négociation, le multi-chemin et l'énergie utilisée ainsi que leur classification.

TABLE 2.2 – Comparaison des protocoles de routages des RCSF

Protocole	Classification	Mobilité	Négociation	Agrégation	Multichemin	Energie utilisée
SPIN	Data-Centric	Possible	OUI	OUI	OUI	Limitée
Diffusion Dirigée						
GAF	Géographique	Limitée	NON	NON	NON	
GEAR						
MECN			NON	NON	OUI	
LEACH	Hiérarchique	Fixe	NON	OUI	NON	
PEGASIS				NON		
TEEN				OUI		
HEED						

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'aborder les principales raisons de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil qui se présente en énergie d'acquisition, de traitement et de consommation. Puis nous avons expliqué les facteurs intervenant dans cette consommation tels que l'état du module radio qui varie entre le mode de réception, de transmission et de sommeil. Sans oublier l'accès au medium de transmission qui englobe la retransmission, l'écoute active, la surcharge, la surécoute, la surémission ainsi que la taille des paquets. Ensuite nous avons détaillé le modèle de propagation et de routage ainsi que les techniques de minimisation de la consommation énergétique. La bonne conception d'un protocole de routage aide le réseau à augmenter sa durée de vie, pour cela nous nous sommes intéressés, vers la fin de ce chapitre, par l'analyse des différents protocoles de routage existant dans la littérature pour ces RCSF, et qui sont divisé en trois types : les protocoles de routage plat, les protocoles basés sur la localisation et les protocoles hiérarchiques.

Le but de ce chapitre est de résumer les différentes caractéristiques qui vont nous aider à concevoir notre propre protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil. Le protocole en question vise à répondre aux problèmes majeurs des RCSF, le problème de la consommation énergétique qui est un grand défi à relever vu que ces noeuds de capteurs sont parfois déployés dans des endroits hostiles et ayant un accès difficile pour changer leurs batteries. Donc nous avons essayé d'implémenter un protocole de routage conçu pour minimiser la consommation énergétique afin de maximiser la durée de vie du réseau.

CONTRIBUTION À L'OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DANS LES RCSF : PROTOCOLE DE ROUTAGE BASÉ SUR LE NOEUD PASSERELLE

Sommaire

3.1	Introduction	43
3.2	Le Protocole de Routage Multi-saut proposé	46
3.2.1	Hypothèses	48
3.2.2	Modèle du Système	48
3.2.3	Organigramme de la Méthode Proposée	51
3.3	Expérimentations et Résultats	52
3.3.1	Paramètres Utilisés	52
3.3.2	Résultats des Simulations	53
3.4	Conclusion	55

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) se composent d'un grand nombre de modules appelés capteurs, ces capteurs ont la capacité de collecter des mesures physiques selon la zone surveillée, puis d'effectuer un traitement sur ces données collectées avant leur acheminement vers une station de base. Parmi les principales exigences des RCSF, la prolongation de la durée de vie du réseau avec une bonne efficacité énergétique tout en maintenant la qualité d'information envoyé au sein du réseau.

Les travaux récents donnent plus d'importance à l'amélioration de la consommation énergétique vue que la communication entre les noeuds capteurs et la station de base est très couteuse. Afin d'avoir des protocoles de routage plus efficaces et des réseaux avec des durées de vie plus longue ainsi que de répondre aux différentes contraintes des RCSF, plusieurs méthodes de communications sont utilisées telles que : les routes optimales (optimal routes en anglais), le regroupement, la fusion, l'agrégation des données et la transmission minimale en fonction de l'énergie de chaque noeud tout au long de l'itinéraire.

Le regroupement par exemple est une technique ayant une grande importance dans les réseaux de capteurs sans fil [Park and Srivastava, 1999]. C'est l'une des nombreuses approches de routage proposées pour prolonger la durée de vie de la batterie des noeuds

capteurs. Comme nous l'avons défini précédemment le routage est le processus de sélection de meilleurs chemins pour transférer les données de leur source à leur destination finale dans le réseau. Dans le regroupement, les noeuds sont organisés en groupes distincts et les données volumineuses provenant des nombreux noeuds sont compressées à l'aide des techniques d'agrégations.

L'objectif principal des techniques d'agrégation est de rassembler et d'agréger les données de manière écoénergétique. Il est nécessaire de réduire le nombre de paquets transmis à la station de base en utilisant des méthodes pour combiner les données en information de haute qualité au niveau des noeuds intermédiaires. Ces techniques tentent de collecter les données les plus critiques des capteurs et les mettre à la disposition de la station de base avec un temps minimum de latence, d'éliminer aussi les transmissions redondantes et de fournir une vue multidimensionnelle et riche de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous proposons une approche de routage qui s'occupe de transférer les données au sein du réseau et qui organise les éléments du réseau en groupe, chaque groupe a son chef qui s'occupe de l'acheminement des données au noeud passerelle approprié. Puis les noeuds passerelles veillent sur l'agrégation des données reçues, et les envoient à la station de base. Le noeud passerelle sert comme un point d'accès qui transmet les données à leur destination finale. Pour valider notre approche proposée, une étape d'évaluation a été effectuée en comparant notre protocole multi saut avec l'un des systèmes existant dans la littérature des RCSF.

Divers protocoles de routage ont été étudiés pour améliorer la durée de vie du réseau pour les RCSF et acheminer les données fusionnées vers la station de base. L'utilisation des techniques de regroupement dans les protocoles de routage aide à mieux organiser la topologie du réseau et à prolonger la durée de vie des différents noeuds. Par exemple, comme nous avons déjà cité dans le chapitre précédent, LEACH est l'un des premiers protocoles de routage hiérarchique conçue pour la minimisation de la consommation énergétique par la distribution des noeuds aléatoirement sur deux phases. Ce protocole a été la base de plusieurs recherches, les scientifiques ont essayé d'améliorer ce protocole en proposant différentes versions au fur et à mesure des années. En 2002, hezeilman et al ont proposé le protocole LEACH Centralized (LEACH-C) [Heinzelman et al., 2002] c'est une version améliorée du protocole LEACH. Dans LEACH-C les chefs des groupes sont sélectionnés d'une manière aléatoire par la station de base contrairement à LEACH où les noeuds sont sélectionnés aléatoirement par le noeud lui-même. Vu que c'est une version améliorée du premier protocole, LEACH-C a aussi deux phases. Dans la première phase, la station de base sélectionne les chefs des groupes en se basant sur l'énergie du noeud, l'emplacement et le niveau d'énergie jusqu'à la station de base ; après la sélection des chefs des groupes, la transmission des messages prend place entre les noeuds ayant le même identifiant du groupe. Concernant la deuxième phase, elle est similaire à celle de LEACH. Le protocole LEACH-C améliore la durée de vie du réseau par rapport au protocole LEACH mais il n'est pas adapté aux grandes zones. En 2011, Naregal et al [Naregal and Gudnavar, 2012] ont proposé un algorithme génétique pour LEACH qui

est LEACH-GA (Génétique Algorithmne). Ce protocole contient une nouvelle phase qui est la phase de préparation où la sélection du chef de groupe est effectuée par tous les noeuds en envoyant un message à la station de base. L'algorithme génétique est utilisé au niveau de la station de base pour trouver la probabilité optimale pour que le noeud devienne chef de groupe avec une consommation énergétique minimale. Cette phase est effectuée une seule fois au début des deux anciennes phases qui sont similaires à celle du protocole LEACH. Le protocole LEACH-GA quant à lui, il minimise l'énergie par rapport à LEACH et LEACH-C. On a aussi le protocole LEACH-E offert par XU et al [Xu et al., 2012], ce protocole utilise la technique du minimum spanning tree pour sélectionner les chefs des groupes en se basant sur l'énergie résiduelle. Une version améliorée par rapport à LEACH-E a été proposée par la modification de la fonction du seuil qui est le protocole LEACH-EX [Sivakumar and Radhika, 2018]. En 2014 l'intra balanced LEACH (IBLEACH) a été introduit par Salim et al [Salim et al., 2014]. Dans ce protocole une nouvelle phase est introduite entre les deux anciennes phases pour améliorer la minimisation de la consommation énergétique du réseau. D'autres protocoles en parallèles avec LEACH et ces versions ont été implémentés, par exemple le protocole SEP qui est Stable Election Protocol proposé par Smaragdakis et al [Smaragdakis et al., 2004]; c'est un protocole à deux niveaux introduisant deux types de noeuds, les noeuds normaux et les noeuds avancés, ayant plus d'énergie que le premier type. Dans ce protocole les deux types de noeuds ont une probabilité de devenir chef de groupe mais les noeuds avancés, vu qu'ils ont plus d'énergie, ont plus de chance. Les noeuds sont déployés aléatoirement, mais si les noeuds normaux sont situés loin de la station de base cela va consommer plus d'énergie lors de la transmission des données ce qui va influencer sur la stabilité du réseau, par conséquent l'efficacité du protocole SEP diminue. Donc, ce protocole ne garantit pas un déploiement efficace des noeuds. Par la suite les chercheurs ont présenté un nouveau protocole ou une nouvelle extension du protocole SEP qui est E-SEP, Enhanced Stable Election protocole proposé par aderohunmu et al [Aderohunmu et al., 2009]. C'est un protocole basé sur des hiérarchies à trois niveaux; il introduit un noeud intermédiaire dont l'énergie se situe entre un noeud normal et un noeud avancé, les noeuds se choisissent comme chef de groupe en fonction de leur énergie. Son inconvénient est identique à celui du protocole SEP. Pour éliminer ses failles, les chercheurs ont proposé un nouveau protocole appelé Zone Stable Election protocole Z-SEP [Faisal et al., 2013] qui consiste à diviser le réseau en région. Dans ce protocole les noeuds normaux, vu qu'ils auront moins d'énergie, seront placés près de la station de base et ils vont transmettre leurs données directement. Cependant, les noeuds avancés seront déployés loin de la station de base pour économiser l'énergie parce qu'ils ont plus d'énergie que les noeuds normaux. La technique du regroupement s'impose pour les noeuds avancés seulement.

Qing et al présente le protocole DEEC qui est Distributed Energy Efficient Clustering Protocol [Qing et al., 2006]. Ce protocole montre une hétérogénéité à plusieurs niveaux; dans le protocole DEEC, l'élection du chef de groupe se base sur l'énergie résiduelle du noeud. Un noeud ayant une haute énergie a plus de chance de devenir chef

de groupe qu'un noeud avec une basse énergie. Monica et al, quant à eux, ils ont développé le protocole Energy Aware routing and multi-hop multi path hierarchy (EAMMH) [Mundada et al., 2012]. Le fonctionnement de ce protocole est divisé en cycle, chaque cycle commence par une phase de configuration lors de la formation des groupes, suivi d'une deuxième phase qui s'occupe du transfert des données vers la station de base. Après le déploiement des noeuds, la découverte du voisinage prend place, chaque noeud utilise l'algorithme de découverte des voisins pour découvrir son entourage. Ainsi en utilisant un algorithme de sélection des chefs des groupes pour choisir un élu parmi un ensemble de noeuds. Puis les chefs des groupes (noeuds élus cluster head) envoient des messages aux autres noeuds pour les informer de leur statut et former les groupes (clusters) ayant une taille fixe. Chaque noeud du groupe gère une table de routage qui contient les informations de routage des noeuds mis à jour. La méthode d'attribution d'intervalle de temps distribué est utilisée (distributed randomized time slot assignment algorithm method), elle permet à plusieurs noeuds de partager le même canal de fréquence en divisant le signal en différents intervalles de temps. Les chefs des groupes agrègent les données de tous les noeuds des groupes et les transmettent à la station de base.

Cependant, lorsque la distance entre les noeuds augmente, la communication consomme plus d'énergie. La communication à multi saut consomme moins d'énergie que les protocoles à un seul saut pour les longues distances. Des recherches ont été effectuées pour mesurer la fiabilité des deux topologies : multi saut et à saut unique, les résultats ont prouvé [Tang et al., 2005b] que la topologie à multi saut est plus fiable que la topologie à saut unique. Elle est adoptée pour prolonger encore plus la durée de vie du réseau et équilibrer, bien évidemment, la consommation d'énergie. Pour cela, nous avons opté pour la proposition d'un protocole de routage à multi saut pour les réseaux de capteurs sans fils.

3.2 Le Protocole de Routage Multi-saut proposé

La topologie à multi saut et à saut unique sont deux méthodes de communication entre les noeuds capteurs. Une étude comparative est réalisée au niveau du Tableau 3.1 tableau, qui met en claire la différence entre une topologie à multi-saut et à saut unique, ce qui explique la raison pour laquelle nous avons opté pour une topologie à multi-saut lors de notre étude. Dans cette section, nous allons expliquer en détails notre nouvelle approche qui consiste à concevoir un protocole de routage à multi saut et qui vise à améliorer la durée de vie des réseaux de capteurs sans fils. Les composants d'un réseau de capteurs sans fils permettent la connectivité au sein du réseau ; chaque composant a une tâche spécifique pour le bon acheminement de données entre les noeuds capteurs jusqu'à leur destination finale. Comme nous avons expliqué précédemment, il existe plusieurs protocoles hiérarchiques qui utilisent le routage à multi saut ; la plupart des noeuds transmettent leurs données au chef du groupe qui s'occupe de l'agrégation, de la compression et finalement de l'envoi des données à la station de base.

TABLE 3.1 – Comparaison entre topologie à saut unique et à multi saut.

Critère de comparaison	Saut multiples	Saut unique
Consommation énergétique	Les noeuds les plus proches à la station de base consomment plus d'énergie que ce qu'ils devront consommer vu qu'ils transmettent aussi non seulement leurs propres données mais aussi les données provenant des autres noeuds	Pour les noeuds situés à proximité de la station de base, l'énergie utilisée pour transmettre les données sera faible, mais pour les noeuds éloignés, cela nécessitera toujours plus d'énergie pour pouvoir acheminer les données à leur destination.
Délai de Transmission	Dépend de la configuration du réseau, en termes de délai, les noeuds les plus proche à la station de base peuvent obtenir leur donnée rapidement sans aucun intermédiaire	Vu qu'il n'existe qu'un seul saut, cette topologie présente moins de retard possible lors de la transmission vers la station de base.
Interférence	Vu que chaque noeud ne transmettant qu'à ses voisins les plus proches, l'énergie de transmission est maintenue basse ce qui atténue donc les effets d'interférence.	Les noeuds les plus éloigné de la station de base nécessitent une énergie élevée, augmentant le nombre d'interférence.
Les noeuds en mode échec	Les parties du réseau impliquant des noeuds défaillant doivent être re-configurées.	Seuls les noeuds défaillants seront affectés et le reste du réseau peut continuer son fonctionnement.

Notre algorithme proposé, ajoute le concept du noeud passerelle (le gateway node) qui minimise la consommation énergétique des noeuds, il agit en tant que pont entre le chef du groupe et la station de base. Les paquets de données sont envoyés d'un noeud au noeud suivant, en fonction de son type, afin d'atteindre leur destination finale. L'objectif d'un tel système hiérarchique est la prolongation de la durée de vie de notre réseau, vu que chaque noeud sélectionné en tant que chef de groupe, agrège les données et les transmet au noeud du niveau supérieur. Dans cette construction hiérarchique la rotation de l'agrégateur joue un rôle très important pour la conservation énergétique.

Alors sur quels critères les noeuds passerelles sont-ils sélectionnés et comment sont-ils déployés dans notre réseau ??

3.2.1 Hypothèses

Notre algorithme est basé sur les hypothèses suivantes :

- Le déploiement des noeuds est aléatoire (dispersé aléatoirement),
- Les noeuds et la station de base sont stationnaire après le déploiement,
- Devenir chef de groupe dépend de la probabilité (P),
- Chaque chef de groupe transmet les données agrégées au noeud passerelle,
- Tous les noeuds communiquent avec leur chef de groupe,
- Pour avoir une consommation énergétique minime, chaque noeud connaît son temps d'exécution,
- Seulement les chefs de groupe ont le droit d'envoyer les données aux noeuds passerelles,
- Devenir un noeud passerelle dépend du pourcentage des noeuds passerelles (h) dans le système,
- La rotation est adoptée,
- Tous les noeuds passerelles transmettent les données compressées à la station de base,
- Seuls les noeuds passerelles communiquent avec la station de base,
- L'énergie de transmission dépend de la distance et la taille du paquet à transmettre,
- Le chef de groupe peut se connecter au noeud passerelle le plus proche,
- L'algorithme fonctionne en itération ou en tours.

3.2.2 Modèle du Système

Cette configuration réseau est conçue pour prolonger la durée de vie du réseau en optimisant la consommation d'énergie. Il est donc important de comprendre comment ces données sont transmises au sein du réseau pour atteindre leur destination finale, qui est la station de base, tous en prenant en compte les caractéristiques des différents noeuds capteurs.

Dans notre cas, la consommation d'énergie peut être réduite en divisant l'algorithme en cinq étapes données comme suit :

3.2.2.1 Déploiement aléatoire des noeuds capteurs

La première étape est l'étape d'initialisation. En effet, on commence par initialiser tous les paramètres de notre algorithme ; ensuite on procède au déploiement qui consiste à placer les noeuds de capteurs dans le réseau, ces noeuds sont déployés aléatoirement dans le réseau. Dans nos expérimentations nous avons utilisé 100 noeuds capteurs y compris la station de base. L'initialisation des différentes valeurs de notre algorithme consiste à affecter l'énergie aux noeuds, la probabilité pour devenir chef de groupe. L'énergie initiale de chaque noeud est environ 0.5 joules. Figure 3.1 illustre les différents points de la première étape de notre algorithme.

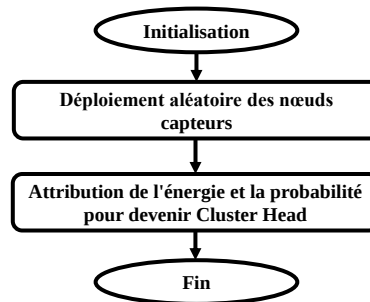


FIGURE 3.1 – Déploiement des noeuds capteurs

3.2.2.2 Election du Noeud Passerelle

Après le déploiement des noeuds dans notre réseau, E_0 étant l'énergie initiale des noeuds normaux. Devenir un noeud passerelle est accordé selon les caractéristiques physiques du noeud telles que la proximité à la station de base et l'énergie résiduelle du noeud. Pour cela, la sélection du noeud passerelle est comme suit : premièrement, on calcule la distance entre tous les noeuds et la station de base, on trie les distances dans

un tableau du plus proche au plus loin ; puis on choisit les noeuds les plus appropriés à devenir des noeuds passerelles en fonction du paramètre h qui est le pourcentage des noeuds passerelles dans le réseau en fonction du nombre total des noeuds ; ensuite on ajuste leur énergie. A mentionner que ces noeuds auront une énergie supérieure à celle des noeuds normaux. Après la sélection des noeuds passerelles, tous les noeuds normaux passent à l'étape suivante et les noeuds passerelles se mettent en veille pour économiser leur énergie.

3.2.2.3 Processus de Regroupement

Tous les noeuds à l'exception des noeuds passerelles vont participer à la formation des groupes dans cette étape. Le rôle principal du chef du groupe est de collecter les données des autres membres du groupe. Donc nous avons deux sous étapes : l'élection du chef de groupe et la formation du groupe. Lors de chaque itération, chaque noeud capteur génère un nombre aléatoire compris entre 0 et 1, puis ce nombre sera comparé à la valeur du seuil de l'Équation 3.1, pour déterminer s'il va devenir chef du groupe ou non. Si ce nombre aléatoire choisi est inférieure à la valeur du seuil calculé, le noeud va devenir chef de groupe pour l'itération en cours.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \left[r \times \text{mod} \left(\frac{1}{P} \right) \right]} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec :

- $T(n)$: Le seuil.
- n : Le noeud choisi.
- P : La probabilité souhaité des chefs des groupes.
- r : L'itération en cours.
- G : L'ensemble des noeuds qui n'ont pas été chef de groupe au cours des itérations précédentes.

Après la sélection des chefs des groupes, chaque noeud normal doit se connecter à son chef le plus approprié, ce qui veut dire, le plus proche afin de construire les groupes de notre réseau. Les chefs des groupes agrègent les données reçues des différents noeuds membres du groupe et les envois au noeud passerelle approprié. Figure 3.2 schématise les principales opérations de cette étape.

3.2.2.4 Connexion du chef de groupe au noeud passerelle approprié

L'algorithme que nous avons proposé limite le fait qu'un noeud passerelle puisse se connecter à un seul chef de groupe, afin d'équilibrer la consommation énergétique et éviter que les noeuds passerelles tombent en panne rapidement. Chaque chef de groupe tente de se connecter au noeud passerelle le plus proche. Pour cela la distance entre le chef de

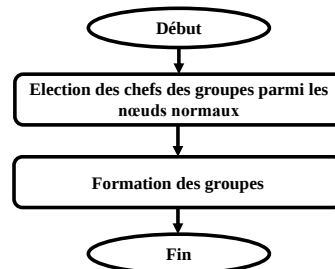


FIGURE 3.2 – Processus de regroupement

groupe et le noeud passerelle est calculée. Le noeud passerelle sera adopté si cette distance est inférieure à la distance entre le chef de groupe et la station de base.

3.2.2.5 Collecte et Transmission des données

Concernant l'étape de collecte et transmission des données les noeuds procèdent comme suit, tous les noeuds membres collectent les informations de l'environnement étudié et les transmettent à leurs chefs de groupe. Chaque chef de groupe fusionne les données reçues de tous les noeuds membres du groupe, puis les envoie à son noeud passerelle. La tâche principale du noeud passerelle consiste à envoyer ces données reçues à la station de base. Vers la fin de cette étape, chaque noeud vérifiera ces restes énergétiques après avoir terminé sa tâche de transmission ; si l'énergie résiduelle est supérieure à zéro, les itérations continuent normalement et tous les noeuds actifs peuvent exécuter à nouveau les précédentes tâches.

3.2.3 Organigramme de la Méthode Proposée

La consommation énergétique est le problème le plus important à prendre en considération lors de la conception de notre protocole. Nous cherchons à avoir un protocole de routage qui consomme le moins d'énergie pendant la transmission des données de la source à la destination. La première étape est l'initialisation de tous les paramètres de notre système et la définition des différentes probabilités à respecter. Puis l'élection des noeuds passerelles de notre réseau. Après avoir différencié les deux premiers types de noeuds, normaux et noeuds passerelles, nous allons commencer nos itérations. Nous al-

lors par la suite procéder à la sélection des chefs de groupes parmi les noeuds normaux suivi de la formation des groupes. Lorsque les groupes sont formés, les noeuds membres de chaque groupe vont envoyer leurs données au chef qui les agrège et les envoie au noeud passerelle approprié. Ce dernier s'occupe par la suite à les acheminer à la station de base. L'organigramme Figure 3.3 ci-dessous présente une description générale des principales étapes du protocole proposé.

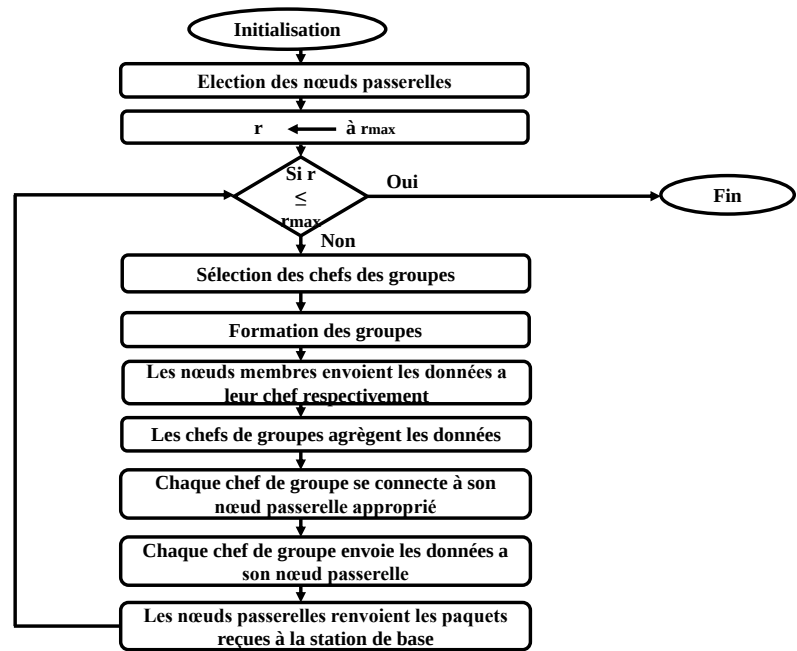


FIGURE 3.3 – Organigramme de l'algorithme proposé

3.3 Expérimentations et Résultats

3.3.1 Paramètres Utilisés

Pour mesurer les performances de notre approche, nous avons réalisé des simulations en utilisant 100 noeuds répartis d'une manière aléatoire dans notre réseau. Nous avons considéré un noeud placé au centre de la zone de détection comme étant la station de base. Au cours de nos simulations, l'effet causé par la collision du signal et les interférences dans le canal (signal collision and interference) sont ignorés. Les paramètres utilisés sont présentés dans le Tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation

Paramètres de simulation	Description	Valeur
E_{elec}	Energie délection	50 * 0.000000001
E_{da}	Energie d'agrégation des données	5 * 0.000000001
E_{amp}	Energie amplificateur	10 *0.000000000001
N	Nombre de noeuds	100
Eo	Energie initial	0.5
K	Nombre de bits transmis	400 bits

Pour le modèle de communication énergétique, nous avons supposé un modèle de dissipation d'énergie simple. En fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, l'énergie dissipée est calculée comme indiqué dans Équation 3.2.

$$E_T(k, d) = \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^2 & d < do \\ k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^4 & d > do \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec :

$$do = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}}$$

E_{fs} et E_{mp} transmit amplifier types, leurs valeurs sont respectivement 10 * 0.000000000001 et 0.0013*0.000000000001.

De plus, afin de recevoir les messages, l'énergie consommée est donnée comme suit :

$$E_{R(k)} = k \times E_{elec} \quad (3.3)$$

3.3.2 Résultats des Simulations

Pour évaluer les performances de notre nouveau protocole de routage à multi saut qui utilise le concept du noeud passerelle, nous l'avons comparé avec deux protocoles existants. Le premier est un protocole de routage simple et le deuxième est un protocole de routage à multi saut et qui utilise aussi le regroupement et les fonctionnalités de minimisation d'énergie. D'après les résultats, nous avons observé que notre approche est plus performante.

3.3.2.1 Evaluation de la durée de vie du réseau en fonction du premier noeud mort

La principale contrainte pour les réseaux de capteurs sans fils est la prolongation de la durée de vie du réseau. Ceci est réalisé en réduisant la consommation d'énergie de chaque noeud. Donc étudier le premier noeud perdu dans un réseau comme critère de mesure de performances d'un protocole est une bonne chose car lorsqu'un réseau perd l'un de ces noeuds lors des premières itérations, cela signifie qu'il y a une mauvaise gestion d'énergie

et qu'il n'y a pas une répartition de tâches entre tous les membres du système et cela affecte la durée de vie, la fiabilité et les performances du réseau.

Le Tableau 3.3, résume les résultats de nos expérimentations pour les trois protocoles en cours d'évaluations. La même simulation est répétée dix fois, à chaque fois, on observe le nombre d'itération qui convient au premier noeud perdu.

TABLE 3.3 – La durée de vie du réseau

Nombre de simulation	Numéro d'itération lorsqu'on perd le premier noeud		
	Premier protocole existant	Deuxième protocole existant	Approche proposée
1	762	566	829
2	777	533	811
3	723	583	806
4	775	530	795
5	771	575	807
6	712	596	799
7	779	596	799
8	751	563	782
9	751	589	794
10	723	600	791

Pour le protocole que nous avons proposé, lors des différentes simulations, la meilleure valeur est de 829 contre 779 pour le premier protocole existant et 600 pour le deuxième protocole existant.

Figure 3.4 schématise la variation du premier noeud perdu par rapport au nombre de simulations exécutées. Nous concluons, que notre protocole, maintient la stabilité de son réseau en gardant le plus possible ces noeuds vivant en le comparant avec les deux autres protocoles ; ce protocole augmente donc la durée de vie du réseau.

3.3.2.2 Evaluation de la durée de vie du réseau en fonction des noeuds vivants

Augmenter la durée de vie du réseau, c'est de pouvoir minimiser la consommation d'énergie de chacun de ces noeuds, afin d'avoir plus de noeuds actifs sur le réseau ce qui permet la poursuite de la transmission des données sur le réseau et contribue à l'augmentation de la durée de vie du réseau. La variation du nombre des noeuds actifs sur le réseau en fonction du nombre des itérations est notée au niveau du Tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Durée de vie du réseau en fonction des noeuds vivants

Nombre d'itération	Nombre des noeuds vivants		
	Premier protocole existant	Deuxième protocole existant	Approche proposée
100	100	100	100
300	100	100	100
600	100	100	100
900	93	22	96
1200	49	7	53
1500	3	3	12
1800	1	3	12

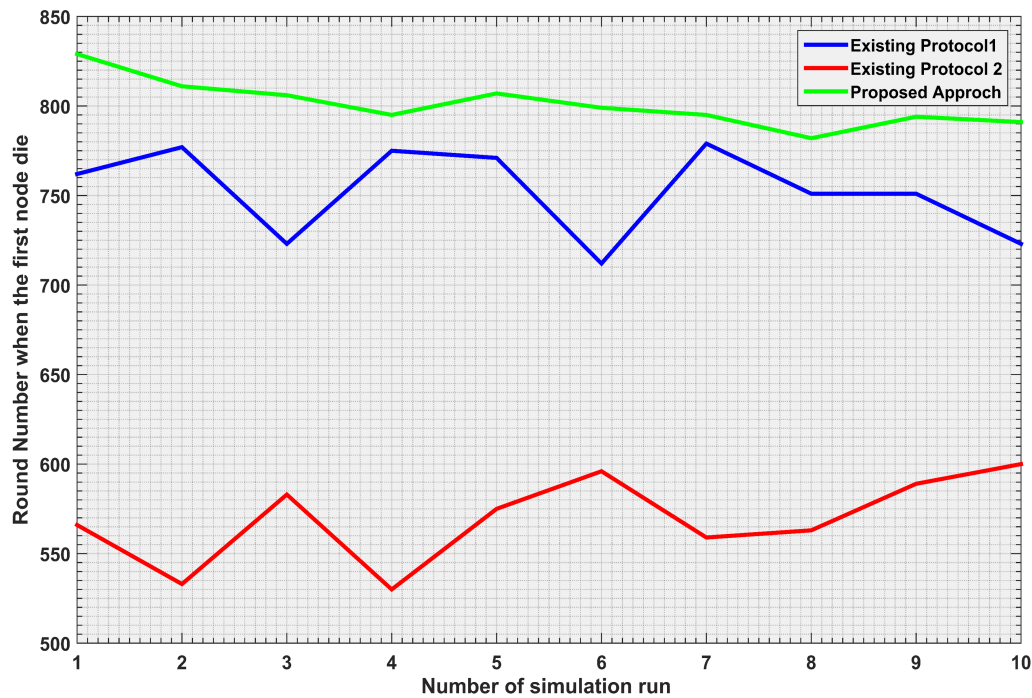


FIGURE 3.4 – Durée de vie du réseau (en fonction du premier noeud perdu et du nombre de simulation réalisé)

De plus, la Figure 3.5 schématise les informations notées au niveau du Tableau 3.4, le nombre des noeuds actifs sur le réseau en fonction de nombre d'itération. On peut conclure que la durée de vie du réseau en utilisant notre nouvelle approche, qui est basée sur le multi-saut, le regroupement et le concept du noeud passerelle, est bien meilleure que celle des deux protocoles existants.

3.4 Conclusion

L'utilisation des batteries par les capteurs est une contrainte critique pour les réseaux de capteurs sans fils. Vu que ces capteurs sont souvent déployés en grand nombre et sans aucune surveillance, il est souvent difficile voire impossible de changer ou de recharger leurs batteries. Pour cette raison, les algorithmes et protocoles conçus pour les réseaux de capteurs sans fils doivent minimiser la consommation d'énergie.

Dans ce chapitre nous avons essayé d'expliquer et d'évaluer notre première contribution visant à optimiser la consommation énergétique dans les RCSF, par la proposition d'un protocole de routage qui se base sur le concept du noeud passerelle. En se basant sur nos expérimentations, l'approche proposée offre de meilleures performances en termes de durée de vie du réseau, et cela grâce aux noeuds passerelles utilisés pour transmettre les données des chefs des groupes à leur destination finale qui est la station de base. De

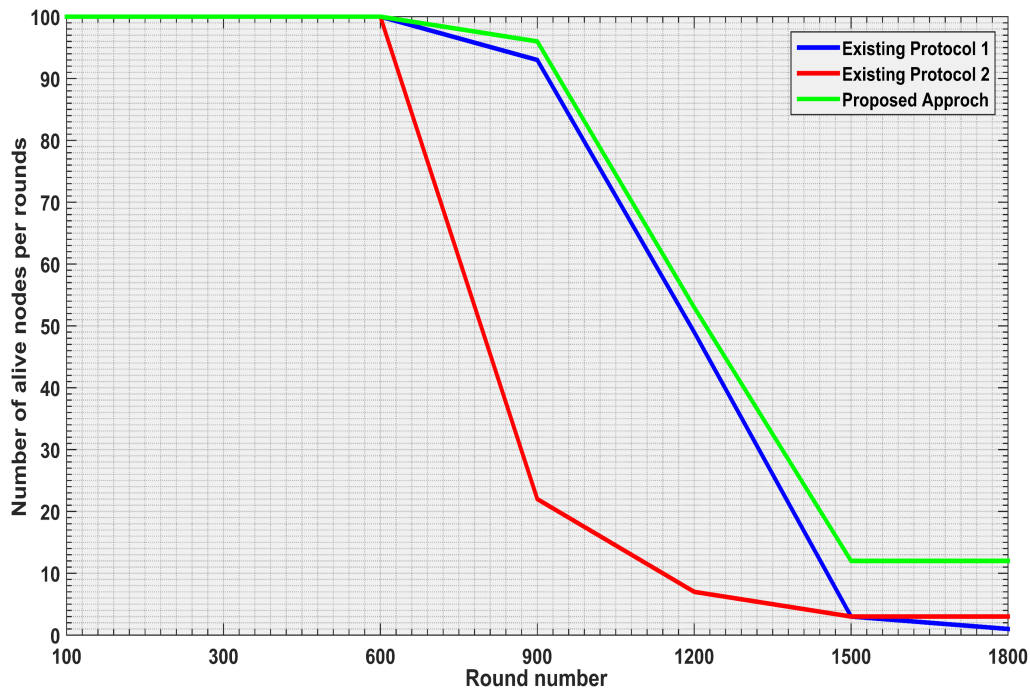


FIGURE 3.5 – Nombre des noeuds vivants par itération

plus, ces chefs des groupes peuvent conserver de l'énergie lors de la transmission des données par les noeuds passerelles ; et ces derniers passent en mode veille après leur sélection et ne participe pas au regroupement ; sans oublier la rotation des chefs de groupe qui est adopté pour balancer la consommation énergétique ; et dernièrement l'architecture de notre approche facilite l'agrégation des données.

Pour le prochain chapitre et afin d'étudier encore plus l'efficacité de notre approche, basé sur le noeud passerelle, nous allons appliquer cette approche dans l'un des domaines d'application des RCSF. Nous allons proposer une application réelle qui a pour but de transmettre un certain type de mesures, en utilisant des noeuds capteurs réelles, peu-couteux, facile à programmer et visant à améliorer l'énergie consommée au sein du réseau.

CONTRIBUTION À L'OPTIMISATION DE L'ÉNERGIE DES RÉSEAUX CORPORELS SANS FILS DANS LE DOMAINE MÉDICAL

Sommaire

4.1	Introduction	61
4.2	Réseau Corporel sans Fils	63
4.3	Application des réseaux corporels sans fils	64
4.3.1	Application Médicale	65
4.3.2	Application Non Médicale	68
4.4	Types des réseaux corporels sans fils	69
4.4.1	Les réseaux corporels sans fils manager	69
4.4.2	Les réseaux corporels sans fils autonomes	70
4.4.3	Les réseaux corporels intelligent	70
4.5	Exigences des réseaux corporels sans fils	70
4.6	Caractéristiques des réseaux corporels sans fils	71
4.6.1	Type des noeuds dans les WBANs	71
4.6.2	Nombre des noeuds dans les WBANs	72
4.6.3	Topologie utilisée dans les WBANs	73
4.6.4	Architecture de communications dans les WBANs	74
4.7	Le routage pour les réseaux corporels sans fils	74
4.7.1	Les défis du routage dans les WBANs	75
4.7.2	Classification des protocoles de routage dans les WBANs	77
4.8	Terminologies utilisées dans notre étude	85
4.9	Vue sur l'ensemble de notre protocole	85
4.9.1	Le modèle adopté par notre système	86
4.9.2	Les étapes adoptées par notre système	86
4.9.3	Modèle énergétique	87
4.9.4	Fonctionnement du protocole : le flux de communication	87
4.10	Simulation et Résultats	89
4.10.1	Paramètres de Simulation	89
4.10.2	Résultats de Simulation	90
4.11	Synthèse	93

4.12	Introduction	97
4.13	Présentation du Problème	97
4.14	Architecture du réseau	98
4.14.1	Protocole de routage basé sur le regroupement pour les réseaux corporels sans fils (CRPBA)	98
4.14.2	Modèle du réseau	99
4.15	Simulation et Résultats	100
4.15.1	Analyse de la durée de vie du réseau	100
4.15.2	Analyse de l'énergie restante	101
4.16	Conclusion	102

Première partie

Réseaux Corporels sans fils : état de l'art et défis

4.1 Introduction

Les dernières avancées révolutionnaires dans les technologies de la micro-électronique et des communications sans fils ont permis le développement des nouveaux noeuds de capteurs moins coûteux. Ces périphériques sont capables d'envoyer les données à travers un support sans fils sans aucune intervention humaine et forment ainsi des réseaux de capteurs sans fils.

Leur flexibilité, simplicité et coût peu élevé permet à ces noeuds d'être exploités dans différents domaines. Les RCSF peuvent être utilisés dans des endroits inaccessibles où l'intervention humaine est très risquée voire impossible, comme la détection des tremblements de terre, les zones touchées par les inondations [Mandal et al., 2005], les zones contaminées [Akyildiz et al., 2002a]. Ce type de réseau peut également être utilisé dans différentes applications telles que : les applications militaires [Đurišić et al., 2012], la sécurité, l'environnementale [Cheong et al., 2011], la domotique [Ni et al., 2009], la surveillance médicale [Halamka, 2006].

Dans ce chapitre, nous allons diriger notre attention au domaine médical, l'application des RCSF dans ce domaine est appelée : Réseau Corporel sans fil, en anglais Wireless Body Area Network (WBAN). C'est un sous champ des RCSF, qui a comme objectif l'observation continue de l'état de santé d'un patient afin de générer une alarme lorsque des conditions critiques sont détectées. Ces réseaux sont composés de petits noeuds biomédicaux dédiés à assurer une surveillance continue des informations physiologiques des patients. Les WBANs sont capables de communiquer et traiter les données physiologiques en plaçant des biocapteurs intelligents à l'intérieure ou l'extérieure du corps humain pour accumuler les informations et les transmettre à la station de base pour les traiter et les analyser. Tableau 4.1 est un tableau comparatif entre les défis des RCSF et des WBANs. Sachant que l'application dans le domaine médical nécessite aussi un fonctionnement à une faible consommation d'énergie c'est l'une des contraintes les plus importantes, chaque noeud doit fonctionner à des températures raisonnables parce que leurs batteries sont très sensibles et l'élévation de la température ou le dépassement de température conduit à une réduction de l'espérance de vie du réseau. La deuxième contrainte est liée à la qualité d'information envoyée par le réseau, l'état du patient est primordial et toute erreur peut être néfaste. Donc notre travail consiste à concevoir un protocole de routage qui permet la surveillance de l'état des patients et cela en adoptant notre approche d'optimisation d'énergie, expliquée précédemment [Abidi et al., 2017], aux applications médicales. Notre chapitre est structuré comme suit ; nous commençons par introduire les réseaux corporels sans fils, puis nous allons discuter quelques travaux existant dans la littérature, ensuite nous allons décrire les points majeurs de notre protocole, ses performances et ses résultats avec une comparaison par rapport aux protocoles existants, et nous allons finir par une conclusion qui résume notre approche et donne une idée sur la structuration de la suite de notre rapport.

TABLE 4.1 – Comparaison entre les WBAN et les RCSF

Défis	WBAN	RCSF
Architecture	Les noeuds capteurs et le noeud central communiquent à travers un assistant personnel digital	Les noeuds peuvent communiquer en utilisant le protocole wifi ou le mode ad-hoc
Technologie sans fils	Nécessite une technologie ayant une consommation énergétique basse	Bluetooth, Zigbee ...
Topologie du réseau	Variable selon les mouvements du corps	Statique
Durée de vie	Plusieurs mois ou année, capacité de batterie plus petite	Plusieurs mois ou années
Taille des noeuds	Essentiellement petit : — Efficace coté énergétique — Facile à utiliser — Reconfigurable — Faible en complexité — Léger	N'est pas importante mais de préférence petite
Remplacement des noeuds	Difficile pour les noeuds implanter	Selon l'application, facile pour les zones accessibles
Tâche des noeuds	Les noeuds effectuent plusieurs tâches	Les noeuds effectuent leurs tâches dédiées
Mobilité	Bouge ensemble et dans la même direction généralement	Généralement considéré étant stationnaire, et la mobilité du noeud ne se produit pas en groupe
Source d'énergie	Inaccessible et difficile à changer	Accessible selon la zone d'application
Impact des données perdues	Important, peut nécessiter des mesures supplémentaires	Peut être compensé par les noeuds redondants
Communication temps réel	Lors de la délivrance du message	N'est pas nécessaire dans toutes les situations
Niveau de sécurité	Elevé afin de protéger les informations du patient	Plus bas

4.2 Réseau Corporel sans Fils

Les réseaux corporels sans fil (WBAN), sont les nouvelles générations des RCSF [Quwaider and Biswas, 2010]. Ces réseaux sont composés de noeuds biomédicaux minuscules, dédiés à assurer une surveillance continue des paramètres physiologiques des patients. Vue le besoin de suivre et surveiller l'état des patients avant et après leurs opérations par exemple, en évitant leur déplacement à chaque fois aux hôpitaux. Ces réseaux corporels sans fils sont constitués de dispositifs à faible puissance et fonctionnant dans, sur et autour du corps de l'être humain pour servir une variété d'application. Bien sûr, les RCSF et les WBANs partagent de nombreuses difficultés surtout la miniaturisation pour que les patients ne se sentent pas déranger lorsqu'ils les portent. En effet, l'évolution des WBANs [Chen et al., 2011] devrait suivre le développement croissant du domaine médical, en visant leur objectif principal qui consiste à assurer un suivi constant des patients à leur maison ou travail. Les noeuds biomédicaux utilisés dans ces réseaux corporels sans fils sont petits, simples, hétérogènes, et placés sur différentes parties du corps humain en fonction de leurs fonctionnalités ; ils peuvent mesurer les données telles que la température, EEG, ECG, EMG, la glycémie etc. Quelques capteurs biomédicaux et leurs fonctionnalités sont indiqués au niveau du Tableau 4.2. Les données mesurées par ces capteurs sont envoyées à un serveur pour qu'elles soient analysées [Ullah et al., 2010]. Figure 4.1 donne un exemple d'implantation de ses capteurs afin de surveiller un patient.

TABLE 4.2 – Capteurs Biomédicaux et leurs fonctions

Capteurs Biomédicaux	Fonctions
Température	Mesurer la température corporelle
Electroencéphalographie (EEG)	Enregistrer l'activité électrique du cerveau
Electrocardiogramme (ECG)	Evaluer les fonctions électriques et musculaires du coeur
Electromyographe (EMG)	Evaluer et enregistrer l'activité électrique produite par les muscles squelettiques
Glycémie	Mesurer la glycémie dans le sang
Gyroscope	Obtenir la rotation du patient
Tension artérielle	Mesurer la pression minimale de diastolique et maximale de systolique
Visuel	Permet d'avoir l'attribut d'un sujet comme une zone, une longueur, un emplacement
CO2	Gaz Mesurer la concentration d'oxygène pendant la respiration humaine et l'altération des niveaux de CO2
Pulse oximetry (SpO2)	Mesurer la saturation de l'oxygène
Spiromètre	Mesurer l'air entrant et sortant des poumons
Capteur ADN	Fournir les informations génétiques nécessaire à toute les fonctions cellulaires

L'objectif des WBANs est de mesurer les signes vitaux des patients et les transférer en temps réel aux médecins, donc plusieurs noeuds de capteurs communiquent en utilisant une interface réseaux pour former un réseau corporel sans fils. Ces noeuds sont utilisés pour détecter, traiter et transmettre les informations vitales et biologiques à la station de base en temps réel, comme nous avons déjà cité au niveau du Tableau 4.2, la température, les battements de coeur, la glycémie, *etc.* Les médecins auront donc un accès en temps réel au rapport qui contient toutes les informations collectées par la station de base et peuvent réagir selon les exigences nécessaires, Figure 4.2.

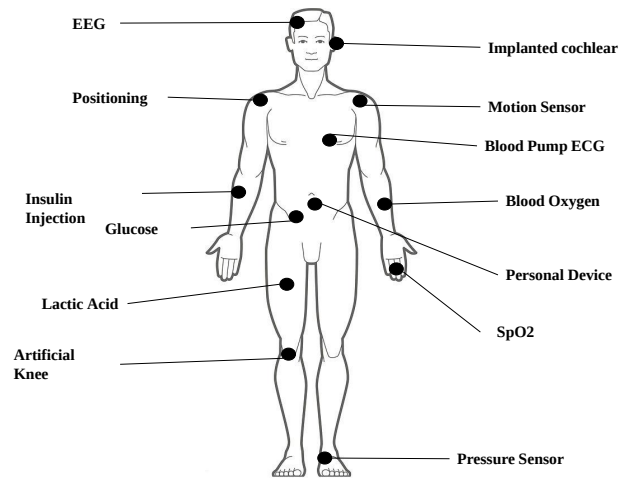


FIGURE 4.1 – Exemple de la surveillance d'un patient

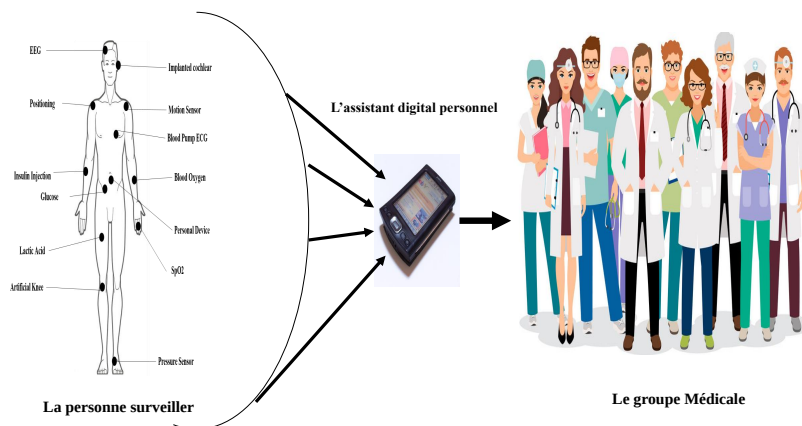


FIGURE 4.2 – Architecture d'un réseau corporels sans fils conçue pour surveiller un malade

4.3 Application des réseaux corporels sans fils

Les WBANs couvrent aussi un large domaine d'application tels que le sport, le militaire, la santé et bien d'autre. Ces applications sont catégorisées en applications "médicales" et "non médicales" comme l'indique Tableau 4.3 qui va être expliqué en détails dans 4.3.1 et 4.3.2, le point commun entre ces deux catégories est l'amélioration de la

qualité de vie de leur utilisateur tous en ayant des exigences technologiques relatives à chaque application.

TABLE 4.3 – Classifications des applications des réseaux corporels sans fils

Applications des WBANs	Médicales	Les WBANs portable	Evaluation de la fatigue chez les soldats et leur état de préparation au combat
			Aide à l'entraînement sportif pour les professionnels ainsi que les amateurs
			Surveiller le sommeil
		Les WBANs Implanter	Surveiller la santé
			Détection des maladies cardiovasculaires
			Détection du cancer
	Non Médicales	Contrôle à distance des dispositifs médicaux	Surveillance des patients
			Systèmes de télémédecines
			Assistance des personnes âgées pour améliorer leur qualité de vie
			Applications de divertissement
			Urgence (non médicale)
			Diffusion en temps réel

4.3.1 Application Médicale

Les WBANs ont un potentiel énorme pour révolutionner le futur de la surveillance des soins de la santé en diagnostiquant de nombreuses maladies qui mettent la vie des personnes en danger et cela en assurant une surveillance en temps réel [Kwak et al., 2010]. L'une des principales causes de décès est liée aux maladies cardiovasculaires, qui sont estimées être autant que 30% des décès dans le monde [Ullah et al., 2008], [Dishman, 2004]. En se basant sur les avancées technologiques en micro miniaturisation, intégration, internet et réseaux sans fils le déploiement et les services de santé seront modernisés, donc l'utilisation des réseaux de capteurs corporels devrait renforcer les systèmes de santé afin de permettre la gestion et la détection efficaces des maladies et réagir aux crises. L'utilisation des WBANs dans les applications médicales permet la surveillance des informations physiologique tels que la tension, les battements de coeur, la température, dans le cas ou des conditions anormales sont détectés les données collectées par les capteurs médicaux seront envoyés à une passerelle telle que les téléphones cellulaires. Cette passerelle s'occupe de transmettre les données à travers un réseau cellulaire ou internet vers un lieu éloigné tel qu'un centre d'urgence pour prendre les mesures nécessaires. En outre, les réseaux WBANs constituent des solutions clés au début du diagnostic, lors du suivi et pendant le traitement des patients atteints éventuellement de maladies mortelles de différents types tels que le diabète, l'hypertension ainsi que les maladies cardiovasculaires. Les applications médicales des WBANs peuvent être classés en trois sous catégories comme suit :

4.3.1.1 Les réseaux corporels sans fils portable (wearable WBAN)

les applications médicales portables des WBANs peuvent en outre être classées en deux sous catégories, assistance aux personnes handicapées et gestion de la performance humaine. Quelques exemples de ces applications sont cités ci-dessus :

- **Evaluation de la fatigue chez les soldats et leur état de préparation au combat :**

Les activités des soldats sur les champs de bataille peuvent être surveillées de plus près par les réseaux corporels sans fils. Cet objectif peut être atteint grâce à un réseau WBAN composé des cameras, des capteurs biométriques, d'un système de positionnement global (GPS) et la mise en place d'un réseau sans fils combiné avec un dispositif d'agrégation pour permettre la communication avec les autres soldats ainsi qu'une surveillance centralisée. Et pour éviter les embuscades, un canal de communication sécurisé devrait exister entre les soldats [Ullah et al., 2012]. Ces réseaux corporels sans fils peuvent également être utilisés par les pompiers et les policiers [Latré et al., 2011]. Leurs utilisations dans des environnements difficiles contribuent à la réduction de probabilité de blessures en fournissant une surveillance temps réel et des soins rapides en cas de blessure.

— **Aide à l'entraînement sportif pour les professionnels ainsi que les amateurs :**

Les horaires d'entraînements des athlètes peuvent être facilement réglés *via* ces réseaux car ils fournissent des paramètres de surveillance, de capture de mouvement ainsi que de réhabilitation. De plus, le retour de l'information en temps réel permet d'améliorer les performances et prévient des blessures qui peuvent être liées à un entraînement incorrect [Lewis, 2008].

— **Surveiller le sommeil :**

le sommeil est un comportement important et une fonction physiologique régulière qui consomme un tiers de notre vie quotidienne. Une grande partie de la population souffre des troubles de sommeil avec une moyenne de 27% de la population mondiale. Les conséquences de ces troubles peuvent être assez graves et conduisent à des maladies cardiovasculaires, à des insomnies au travail, et à des risques de s'endormir en conduisant. Les troubles de sommeil peuvent avoir des effets négatifs sur la productivité au travail donc la surveillance du sommeil a suscité un grand intérêt ces dernières années. L'analyse des troubles de sommeil peuvent être réalisés à travers un test de polysomnographie, qui nécessite l'analyse d'un certain nombre de bipotentiels enregistré pendant la nuit dans un laboratoire de sommeil. Cependant, ces mesures nécessitent l'utilisation de beaucoup de câbles qui partent de la tête dans une boîte attachée à la ceinture du patient et qui interrompent le patient de tomber en sommeil. Cela perturbe également les mouvements des patients et introduit du bruit qui réduit la qualité du signal. Les réseaux WBANs sont capables à l'aide de leur noeud de capteurs de retirer tous ces câbles [de Vicq et al., 2007].

— **Surveiller la santé :**

L'utilisation des réseaux corporels sans fils, en utilisant des noeuds capteurs et d'autres dispositifs sur le corps humain, peut fournir une surveillance à temps réel de la santé des patients. Par exemple le Glucocellephone est un téléphone cellulaire avec un module de glucose qui peut être utilisé par les patients diabétiques. Le téléphone portable reçoit des diagnostics de glucose de la part du module de glucose qui peuvent ensuite être stockés ou envoyés à un médecin pour les analyser

[Lewis, 2008].

4.3.1.2 Les réseaux corporels implantés (implant WBAN)

Cette sous-catégorie d'application est relative aux noeuds implantés dans le corps humain soit sous la peau ou dans le sang.

- **Contrôle du diabète :**

6.4% des adultes de la population mondiale, qui représente 285 millions de personnes, sont atteintes de diabète en 2010. Ce nombre devrait atteindre 438 millions d'ici 2030, ce qui représente 7.8% de la population des adultes. Les recherches ont montré que le diabète entraîne des problèmes médicaux à long terme s'il n'est pas surveillé et traité. La surveillance fréquente fournie par ces réseaux est capable de réduire le risque d'évanouissement et permet un dosage correct ainsi qu'il élimine les risques de complication grave dans la vie [WDF, 5 30], [Diabetes, 5 30].

- **Détection des maladies cardiovasculaires :**

Les maladies cardiovasculaires sont connues comme la principale cause du décès pour 17 millions de personnes par an [Cardiovasculaire, 5 30], ce qui peut être considérablement réduit ou prévenu avec l'utilisation des soins de santé appropriés. Les arrêts cardiaques peuvent être considérablement réduits en surveillant périodiquement les conditions anormales via les réseaux corporels sans fils.

- **Détection du cancer :**

les estimations des taux de mortalité du cancer sont estimées à augmenter de 50% pour atteindre 15 millions d'ici 2020. Les noeuds de capteurs médicaux sont capables de surveiller les cellules cancéreuses chez le corps humain ce qui permettra aux médecins de diagnostiquer continuellement les tumeurs sans biopsie ainsi qu'une analyse et un traitement plus rapides [Detection, 5 30].

4.3.1.3 Les réseaux corporels ayant un contrôle à distance des dispositifs médicaux

L'omniprésence de la connectivité internet des WBANs permet la mise en réseau des dispositifs et services des soins à domicile, où chaque réseau corporel communique sans fils avec un réseau médical. Ces services visent à prolonger les soins autodirigés des patients qui sont assistés dans leur maison, améliore la qualité de vie et réduit les coûts pour la société. En réalité, ces nouveaux services favorisent une nouvelle génération des systèmes informatiques présentant ainsi des caractéristiques telles que la flexibilité, la connaissance du contexte et la convivialité [Nehmer et al., 2006].

- **La surveillance des patients :**

Une application clé des réseaux corporels sans fils et leur utilisation pour surveiller les signes vitaux et fournir ces informations en temps réel sur le processus d'application de surveillance de la santé. Plus précisément, ils transmettent des mesures tels que la fréquence des battements du coeur, la température corporels, la pression artérielle, la fréquence de respiration. Ces réseaux sont également capables d'admi-

nistrer les médicaments dans les hôpitaux, la surveillance à distance des données physiologiques humaines, fournir une interface pour le diagnostic, la surveillance continue du patient et l'offre des médicaments nécessaires en cas de besoin. Sans oublier que ces WBANs peuvent assurer l'interconnexion entre divers appareils dans ou autour du corps humain tels que les appareils auditifs, les lunettes numériques, donc leurs applications pourrait partir au-delà de la surveillance des patients et peut inclure le suivi du traitement, la recherche pharmaceutique, l'assistance à distance en cas d'accident ainsi que la recherche des maladies chroniques.

— **Systèmes de télémédecines :**

Les systèmes de télémédecines existant consistent à utiliser des protocoles qui sont gourmand en énergie tel que le Bluetooth, qui est ouvert aux interférences d'autres appareils opérant sur leur même environnement. Fréquemment les canaux sans fils sont dédiés pour transférer les informations aux stations distantes. Par conséquent, cela limite la surveillance prolongée.

4.3.2 Application Non Médicale

Concernant les applications non médicales des réseaux de capteurs médicaux, elles peuvent être classées en cinq sous catégories comme suit :

4.3.2.1 *La diffusion en temps réel*

Cette classe d'application implique la diffusion des vidéos telles que la capture d'une vidéo par la caméra d'un téléphone cellulaire, des vidéo 3D, un défilé des articles de sport et les dernières créations de mode. La diffusion audio est également possible par la communication vocale par exemple écouter les explications dans un musée ou bien écouter les informations sur les horaires de bus à l'arrêt de bus, la multidiffusion pour les conférences téléphonique et en parcourant des échantillons de musique dans un magasin de CD de musique. Cette sous-catégorie inclus également le transfert de flux qui est utilisé pour le contrôle à distance des appareils de divertissement, la reconnaissance des gestes du corps ainsi que la capture des mouvements, les signes vitaux du corps et les services de divertissement basés sur l'information, l'identification la détection d'émotion et de surveiller les choses oubliées en envoyant une alerte au propriétaire.

4.3.2.2 *Les applications de divertissement*

Cette sous-catégorie inclus les applications des jeux et réseaux sociaux, les appareils tels que les microphones, les lecteurs MP3, les appareils photo et les appareils informatiques avancés pouvant être utilisés comme des appareils intégrés aux réseaux de capteurs médicaux. Ils peuvent être utilisés également dans la réalité virtuelle, les jeux comme celui de contrôle avec les mains, les mouvements corporels et les jeux du monde virtuel. Ils peuvent être utilisés aussi pour le suivi personnel des articles, les échanges de profil numérique comme l'échange des cartes de visite.

4.3.2.3 *Les urgences (non médicales)*

les capteurs peuvent être utilisés, comme nous avons déjà mentionné, en dehors du domaine médical, par exemple ces capteurs sont capables de détecter une urgence non médicale comme un feu dans une maison ou des gaz inflammables ou toxiques dans une maison, leur rôle est de communiquer en urgence ces informations aux dispositifs portés sur le corps pour avertir le porteur de l'urgence.

4.3.2.4 *La détection des émotions*

Les recherches récentes ont montré la réalisation effective des émotions humaines par l'analyse des données de la parole et du visuel. Plus spécifiquement, les technologies de détections portables ont permis la détection des émotions grâce à l'induction des manifestations physiques dans tous le corps humain qui mène à la production des signaux à mesurer par de simples biocapteurs. Par exemple, la peur fait augmenter le taux de la respiration et le rythme cardiaque, ce qui entraine la transpiration des paumes et plus encore. Par conséquent, l'état d'émotion peut être surveillé n'importe où et n'importe quand, et cela en surveillant les signaux physiologiques liés aux émotions comme EEG, ECG, EMG. Et cela par l'intégration des biocapteurs portables dans des boucles d'oreilles ou des montres, des capteurs de respiration dans les t-shirts, des capteurs de conductivités dans les chaussures, *etc.*

4.3.2.5 *L'authentification sécurisée*

Cette sous-catégorie concerne l'utilisation de la biométrie à la fois physiologique et comportementale telle que la reconnaissance de l'iris, les empreintes digitales et les motifs faciaux. C'est l'une des applications clés des WBANs vu la duplication et la falsification qui ont encouragé l'utilisation des nouvelles caractéristiques techniques comportementales et physiques du corps humain, essentiellement la biométrie.

4.4 **Types des réseaux corporels sans fils**

4.4.1 **Les réseaux corporels sans fils manager**

Ce type de WBAN est utilisé dans le cas des applications corporelles sans fils médicales, dans lesquels les données sont rassemblées et envoyées à toutes les personnes autorisées ou expert médicales pour prendre des décisions concernant les données détectées. L'avantage de ce type de réseaux, c'est que tous les signes physiologiques sont analysés et diagnostiqués en même temps ; par contre leur inconvénient majeur, c'est que la situation du patient, va s'aggraver encore plus dans le cas où la personne autorisée à répondre est occupé ou entrain de faire un autre travail.

4.4.2 Les réseaux corporels sans fils autonomes

Les WBAN autonome, c'est lorsque les capteurs biomédicaux sont connectés entre eux et créent une action sur le corps humain selon les données détectées sans aucune décision de l'expert médical ou de la personne autorisée à réagir. Et cela est plus bénéfique dans les situations d'urgence. Les actionneurs (actuators en anglais) sont des types spécifiques des noeuds, qu'on va aborder au niveau des sections suivantes en détails, et se sont eux qui interagissent avec les utilisateurs pour acquérir les données des autres capteurs biomédicaux.

4.4.3 Les réseaux corporels intelligent

Il s'agit d'un réseau intelligent constitué d'un groupement des deux types précédent autonome et manager, et ici il s'agit de deux situations, une simple et l'autre complexe. Concernant la situation simple, les décisions sont assumées par les noeuds actuators. Mais pour la deuxième situation qui est complexe, les données détectées sont envoyées à l'expert médical ou à la personne autorisée, mais les réseaux corporels intelligents prennent la décision après un intervalle de temps spécifique si le groupe médical est occupé.

4.5 Exigences des réseaux corporels sans fils

En raison des contraintes spécifiques des réseaux corporels sans fils, ou plus généralement les réseaux de capteurs médicaux, il est difficile d'utiliser les normes traditionnelles des réseaux de capteurs sans fils. Certaines implémentations pour les WBANs utilisent le Bluetooth (IEEE 802.15.1) mais ce type possède une pile de protocole complexe et une consommation d'énergie élevée par rapport à la IEEE 802.15.4 ; par conséquent, les implémentations plus courantes des WBANs utilisent IEEE 802.15.4 ou zigbee, mais ce n'est pas la meilleure solution pour la communication dans les WBANs, il peut être utilisé pour une mise en oeuvre simple et rapide. Donc un modèle standard était requis pour une mise en oeuvre réussie des réseaux corporels sans fils, un groupe IEEE a été lancé en novembre 2007 connu sous le nom de IEEE 802.15.6 pour la réalisation de la normalisation internationale [Kwak et al., 2010] pour les WBANs. Ce dernier a établi le premier projet de norme de communication des réseaux corporels sans fils en avril 2010, puis la version approuvée de la norme IEEE 802.15.6 en février 2012. Cette norme de communication optimisée pour les WBANs est caractérisée par une faible puissance, une courte portée et une communication de données fiable.

Parmi les exigences principales des réseaux corporels dans la norme IEEE 802.15.6 on y trouve :

- ☐ Chaque réseau doit pouvoir prendre en charge 256 noeuds.
- ☐ Les noeuds doivent être capables de communiquer de manière fiable même quand la personne est en mouvement, les données ne doivent pas être perdues en raison de

conditions de canal instables. Il faut que les applications prennent en considération le mouvement du corps postural relative au faite de marcher, tourner, courir, agiter les bras, danser.

- La latence et la fiabilité doivent être prises en charge par les applications, par exemple la latence devrait être moins de 125 ms pour les applications médicales et moins de 250 ms pour les applications non médicales.
- Ces réseaux doivent fonctionner dans les environnements hétérogènes ou les environnements de normes différentes, ainsi ces composants doivent coopérer entre eux pour recevoir les différentes informations.
- Des mécanismes d'économie d'énergie devraient être intégrés pour permettre à ces réseaux de fonctionner à une faible consommation d'énergie.

4.6 Caractéristiques des réseaux corporels sans fils

4.6.1 Type des noeuds dans les WBANs

Un noeud dans les WBANs est défini comme un périphérique indépendant ayant une capacité de communication. Les noeuds peuvent être classés en trois différents groupes, premièrement en fonction de leur fonctionnalité, deuxièmement en fonction de leur implémentations et troisièmement en fonction de leur rôle dans le réseau.

4.6.1.1 Classification des noeuds en fonction de leur fonctionnalité

La classification des noeuds en fonction de leur fonctionnalité est la suivante :

— **Dispositif personnel (DP) :**

Se charge de la collecte de toutes les informations reçues des capteurs et gère les interactions avec les autres utilisateurs. Le DP informe l'utilisateur à travers une passerelle externe. Ce dispositif peut être appelé aussi station de base ou unité de contrôle du corps en anglais Body Control Unit (BCU) [Latré et al., 2011].

— **Capteur :**

Les capteurs dans les WBANs comme nous avons mentionné précédemment, mesurent certains paramètres dans le corps soit de façon interne ou externe. Ces noeuds collectent et traitent les données nécessaires et fournissent une réponse. Ces capteurs sont soit des capteurs physiologiques ou bien biocinétiques. Certains types existants de ces capteurs peuvent être intégrer dans des montres, des téléphones portables ou des écouteurs afin de permettre la surveillance sans fils d'une personne n'importe où, quand et avec qui. Un tableau explicatif de quelques différents types des capteurs disponible dans le commerce 4.2 et utilisé dans les WBANs a été mentionné au début de ce chapitre.

— **Actuator :**

Interagit avec l'utilisateur lors de la réception des données des capteurs. Son rôle est de fournir des commandes dans le réseau en agissant selon les données captées ;

par exemple le pompage de la bonne dose des médicaments dans le corps, dans le cas des applications médicales [Wang and Park, 2009].

4.6.1.2 *Classification en fonction de la manière dont les noeuds sont implémentés :*

La deuxième classification est en fonction de la manière dont les noeuds sont implémentés dans les réseaux corporels sans fils proposé par le standard IEEE 802.15.6 et qui est fournie comme suit :

- **Les noeuds planter** : Ce type de noeud est implanté dans le corps humain, soit immédiatement sous la peau ou à l'intérieur des cellules corporels.
- **Les noeuds sur la surface du corps** : Ce type de noeud est soit placé à la surface du corps humain soit à 2 centimètres à celui-ci.
- **Les noeuds externes** : Ce type de noeud n'est pas en contact avec le corps humain mais plutôt à quelques centimètres jusqu'à cinq mètres du corps humain.

4.6.1.3 *Classification en fonction du rôle des noeuds*

La troisième classification est en fonction du rôle des noeuds dans le réseau, elle est comme suit :

- **Le coordinateur** :
Le noeud coordinateur est comme une passerelle vers le monde extérieur, nommé aussi centre de confiance ; dans un réseau corporel le coordinateur est le dispositif par lequel tous les autres noeuds communiquent.
- **Les noeuds d'extrémité** :
Les noeuds d'extrémité dans les WBANs sont limités à effectuer leur application intégrée. Donc ils ne sont pas capables de transmettre les messages des autres noeuds.
- **Les noeuds relais** :
Les noeuds intermédiaires sont appelés relais. Ils ont un noeud père qui possède un noeud enfant et des messages de transmission. Essentiellement, si un noeud se trouve à l'extrémité, toutes les données envoyées doivent être transmises par d'autres noeuds avant d'atteindre le dispositif personnel ou la station de base.

4.6.2 **Nombre des noeuds dans les WBANs**

Selon des projets de norme IEEE relatives aux exigences techniques des réseaux corporels [a, 2007], [b, 2011], le nombre des noeuds dans ce type de réseau va de quelques capteurs communiquant avec un dispositif de base allant jusqu'à des dizaines voire des centaines de capteurs communiquant avec une passerelle vers internet. Un réseau typiquement corporel aurait 6 noeuds avec une configuration évolutive prenant en charge jusqu'à 256 noeuds. Les exigences de ces réseaux mentionnent également un rang de fonctionnement de 3 mètres pour ce type de réseau pouvant aller jusqu'à 10 piconet (qui est constitué de deux ou plusieurs objets occupant le même canal physique) par personne avec un sup-

port de 256 noeuds pour chaque réseau dans chaque 6 mètres cube [Zhen et al., 2008], [Hanlen et al., 2009], [Zhang et al., 2010].

En général le nombre de noeuds dans les WBANs n'est pas limité ; mais en raison des limites de la nature du réseau, de son architecture ainsi que des techniques de transmissions, ces nombres peuvent être limités dans des scénarios d'application réelle. Par exemple, quelques chercheurs [Otto et al., 2006] ont précisé le nombre maximal des noeuds dans un WBAN à 20 noeuds ; chaque super trame d'une longueur d'une seconde étant divisée en un intervalle de temps continue de 50 ms, permettant ainsi à ces 20 noeuds de transmettre orthogonalement. D'autres chercheurs ont considéré le nombre maximal de noeuds à 50 [Zasowski et al., 2003], ce qui a déterminé un total de 50 canaux orthogonaux destiné à être alloués aux noeuds durant chaque intervalle de temps. En effet, il est indiqué que le type et le nombre de composant formant un réseau corporel évoluent dans le temps en fonction de leur interaction et environnement.

4.6.3 Topologie utilisée dans les WBANs

Le groupe du travail du standard de communication IEEE 802.15.6 a estimé que les WBANs fonctionnaient sous une topologie en étoile à saut unique ou multiple. Le noeud situé au centre de l'étoile, prend un emplacement approximatif de la ceinture de la personne [Tachtatzis et al., 2010], [Shah and Yarvis, 2006]. Il existe deux types possibles de transmission de données dans la topologie en étoile à saut unique : la transmission du périphérique au coordinateur qui est le noeud au centre de la topologie en étoile, qui contrôle la communication et la transmission du coordinateur au périphérique. Concernant les méthodes de communications dans ce premier type, le coordinateur définit le début et la fin des super trame de transmission afin de contrôler le réseau et synchroniser les périphériques ; concernant le cycle du système, il est défini par l'utilisateur. Une autre méthode consiste à utiliser l'accès multiple avec détection de porteuse en évitant les collisions (CSMA / CA) en cas de nécessité. Les noeuds ont besoin d'allumer et d'interroger le coordinateur pour recevoir les données, donc le coordinateur ne peut pas toujours communiquer avec les noeuds, mais ils ont besoin d'attendre qu'il soit invité à participer à une communication [Sukor et al., 2008]. Donc en général, lorsque tous les noeuds sont directement connectés au récepteur qui est le coordinateur, le réseau est considéré ayant une topologie en étoile à un saut ; mais dans une architecture à multi-sauts, les noeuds sont connectés au point d'accès via d'autres noeuds. Une comparaison entre ces deux types de topologie a été réalisé [Natarajan et al., 2007], elle montre que la transmission à multi-sauts a un retard plus long et une énergie de transmission inférieure à celle de la topologie en étoile à saut unique. Plus spécifiquement, l'utilisation des noeuds intermédiaires aide à réduire la concentration de l'énergie de transmission de la source vers sa destination ; plus la distance entre la source et la destination est élevée, plus l'énergie de transmission est élevée.

4.6.4 Architecture de communications dans les WBANs

L'architecture de communication dans les réseaux corporels sans fils peut être divisée en trois niveaux différents :

4.6.4.1 Niveau 1 Communication intra-WBAN :

La communication intra est réservée au dispositif du même type (capteur par exemple) dans le but d'échanger des informations : ce niveau décrit donc les interactions entre les noeuds ainsi que leur rang de transmission (approximative à 2 mètres) sur et autour du corps humain. Au niveau du premier niveau, des capteurs variables s'utilisent pour transmettre les signaux corporels au serveur personnel (PS), les données physiologiques capturées et traitées sont ensuite transmises à un point d'accès au second niveau.

4.6.4.2 Niveau 2 Communication inter-WBAN :

C'est une communication entre différent type, ayant les mêmes tâches à exécuter, donc cette communication se situe entre le serveur personnel du niveau 1 et un ou plusieurs points d'accès. Les points d'accès peuvent être considérés comme faisant partie de l'infrastructure ou même être placé d'une manière stratégique dans un environnement dynamique pour gérer les situations d'urgence. La communication à ce niveau vise à interconnecter les réseaux corporels avec les divers réseaux facilement accessibles au quotidien comme les réseaux cellulaires et internet.

4.6.4.3 Niveau 3 Communication au-delà des composants du réseau

La conception de ce niveau de communication est selon le domaine d'application. Une passerelle peut être utilisée pour établir un lien entre la connexion du niveau précédent et ce niveau. Essentiellement, internet pour communiquer avec le serveur médical dans le cas d'une application de surveillance de la santé des patients. Cependant, la conception de ce niveau pour la communication est spécifique à l'application. Dans le domaine médical, une base de données est l'un des principaux composants les plus importants de ce dernier niveau, car cette base de données contient l'historique et le profil du patient en question. Ainsi les médecins ou les patients peuvent être informé en cas d'urgence par internet ou par un service de messagerie. De plus ce niveau permet de restaurer toutes les informations d'un patient pouvant être utile pour son traitement.

4.7 Le routage pour les réseaux corporels sans fils

De nombreux protocoles de routage ont été conçus pour les réseaux de capteurs sans fils [Akkaya and Younis, 2005]. Les WBANs ont des contraintes énergétiques plus strictes en termes d'énergie de transmission par rapport aux capteurs traditionnels, en particulier pour les noeuds implantés qui nécessitent une intervention chirurgicale dans certains cas.

Par conséquent, il est essentiel que les WBANs aient une durée de vie plus longue pour éviter une recharge et un remplacement constants des noeuds attachés à une personne.

4.7.1 Les défis du routage dans les WBANs

- **Les mouvements du corps :** La mobilité des noeuds et les obstacles environnementaux font augmenter la consommation énergétique dans les WBANs. En plus, ces modifications fréquentes dans la topologie et les conditions de fonctionnement influencent sur la qualité de service du réseau ; en effet la qualité du lien entre les noeuds dans ce type de réseau varie en fonction du temps nécessaire pour effectuer divers et certains mouvements du corps [Maskooki et al., 2011]. Donc, les algorithmes de routage proposés doivent être adaptés aux différents changements de topologie et adaptés à certains segments du corps et vêtements qui entraînent un blocage du signal intensif.
- **Elévation de la température et des interférences :** Le niveau d'énergie des noeuds dans les protocoles de routage proposé doit être pris en considération en fonction de l'énergie disponible et de la puissance de calcul. Donc, afin de minimiser les interférences et d'éviter les réchauffements de la peau, l'énergie de transmission des noeuds doit être extrêmement faible [Ullah et al., 2012].
- **Energie :** les protocoles de routage proposés doivent distribuer les données de communication entre les noeuds du réseau pour équilibrer la consommation énergétique et minimiser les défaillances des batteries d'alimentation. L'objectif majeur de ces protocoles de routage est de réduire l'énergie nécessaire pour acheminer les données entre la source et la destination dans l'ensemble du réseau, c'est la solution pour résoudre le problème de la durée de vie du réseau. Selon quelques chercheurs [Akyildiz et al., 2002a] la consommation énergétique des noeuds peut être regroupée en détection, en communication et en traitement des données. Les méthodes de minimisation d'énergie peuvent être catégorisées en contrôle d'énergie de transmission (transmission power control) où les noeuds transmettent les données physiologiques à la station de base, et le protocole de contrôle d'accès à faible puissance qui a une grande efficacité énergétique ; ce protocole met aussi l'accent sur la bande passante et les mécanismes de protection [Li and Tan, 2009].
- **Durée de vie globale du réseau :** La durée de vie du réseau dans les réseaux corporels sans fils correspond à l'intervalle de temps entre le démarrage du réseau jusqu'à son endommagement. Un réseau endommagé dépend de sa topologie et le rôle de chaque noeud ; dans certains cas, la destination ne peut plus être atteinte. Le remplacement et le chargement de la batterie n'étant pas réalisables dans les dispositifs médicaux implantés. Donc la durée de vie du réseau est plus importante que toutes les autres contraintes du réseau de capteurs sans fils.
- **Limitation du nombre de sauts des paquets :** Selon le projet de norme IEEE, une communication à saut unique et à deux sauts est autorisée dans les WBANs,

tandis que la transmission à multi saut fournit des liens plus forts ce qui augmente de manière générale la fiabilité du système, mais plus le nombre de sauts est élevé, plus la consommation énergétique est importante. Cependant, une limitation dans le nombre de sauts par rapport aux paquets n'est pas prise en compte dans la plupart des protocoles de routage pour les réseaux corporels sans fils.

- **Environnement hétérogène** : Des applications spécifiques des WBANs peuvent nécessiter une collecte de données hétérogènes à partir des différents capteurs avec différentes fréquences d'échantillonnages. Donc la prise en charge de la qualité de service dans les réseaux corporels sans fils peut être assez difficile.
- **La limitation des ressources** : La capacité des données, l'énergie et la durée de vie des composants de ces réseaux sont strictement limités. Donc en raison de la limitation des ressources disponibles dans les WBANs, ces réseaux peuvent échouer à cause des batteries non disponible, de la limitation de mémoire ce qui menace en premier la qualité de service de ces réseaux.

Un classement est effectué en analysant les travaux de recherches, de ces dernières années, spécialisés dans les protocoles de routage des réseaux corporels sans fils ; ce classement va nous servir pour faire face aux différents défis de routage indiqués précédemment ainsi que la proposition des solutions pour améliorer les WBANs. On peut classer ces réseaux en cinq groupes, sur la base de : leur emplacement, leur structure, leur dégagement de chaleur, leur couches et qualité du service (QoS). La Figure 4.3 résume l'ensemble de cette classification ainsi qu'un exemple de leurs protocoles.

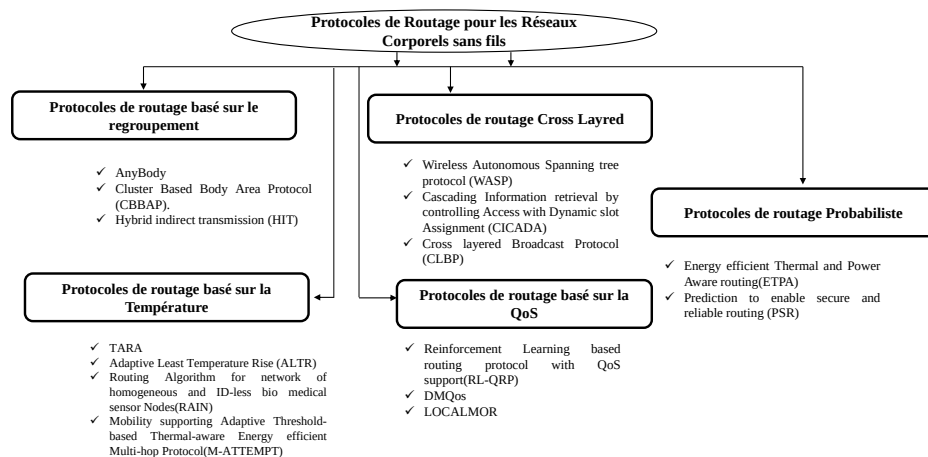


FIGURE 4.3 – Classification des protocoles de routage pour les réseaux corporels sans fils.

4.7.2 Classification des protocoles de routage dans les WBANs

4.7.2.1 Algorithme basé sur le regroupement (*Cluster based algorithms*)

La première classe des protocoles de routage conçue pour les réseaux corporels sans fils est basée sur le regroupement, ce qui consiste à diviser les noeuds du réseau en groupes différents et à affecter à chaque groupe un chef. Les données seront acheminées via le chef de groupes à la station de base. L'objectif de ce groupe de protocole de routage est de minimiser le nombre de transmissions directes des différents noeuds vers la destination finale. Donc le retard dû à la construction des groupes est le principal inconvénient de ces protocoles. Pour réduire le nombre de transmission directe à la station de base les protocoles de cette classe utilise une méthode économe en terme d'énergie dans laquelle les groupes se forment et les noeuds ayant une haute énergie se chargent de détecter et d'envoyer les informations aux chefs de groupes ; ces protocoles contribuent à l'évolutivité, la minimisation de l'énergie et la maximisation de la durée de vie du réseau. Parmi les protocoles proposés par les chercheurs, nous trouvons le protocole de routage et collecte de données Anybody [Watteyne et al., 2007] ; cette approche proposée est basée sur le protocole LEACH, réduit l'énergie en choisissant ces chefs de groupes à un intervalle de temps régulier. Les données sont ensuite collectées et envoyées à la station de base à travers le chef de groupe. LEACH suppose que tous les noeuds se trouvent au même rang d'envoi que la station de base, tandis que le nouveau protocole Anybody résout ce problème en changeant la sélection des chefs de groupe et en créant un réseau de base spécifique pour les chefs de groupes. Mais d'un autre coté la fiabilité n'est pas prise en compte et l'efficacité énergétique n'est pas complètement étudiée. Une autre amélioration du protocole LEACH pour prolonger la durée de vie du réseau est le protocole Hybrid Indirect Transmission (HIT) [Moh et al., 2005] ; ce protocole est basé sur une architecture hybride composée d'un ou de plusieurs groupes, chacun étant basé sur une transmission indirecte à sauts multiples afin de minimiser la consommation énergétique ainsi que le retard du réseau. Le concept de ce protocole peut être résumé ainsi, tout d'abord on a la sélection des chefs de groupe, puis la publicité des chefs de groupe qui consiste à diffuser leurs statuts sur le réseau, puis la formation des groupes dans laquelle un ou plusieurs groupes se forme après la configuration de la route afin de former plusieurs routes dans un groupe. Il y a également l'étape de calcul de l'ensemble bloqué dans laquelle chaque noeud trouve sa liste des noeuds bloqués puis la planification TDMA est calculée, et finalement la grande phase de transmission de données dans laquelle chaque noeud transmet les données envoyées au chef de groupe à travers ses voisins. La Figure 4.4 montre un exemple du protocole HIT.

Vu que le mécanisme de routage peut être catégorisé comme une opération gourmande d'énergie, le protocole de routage Cluster Based Body Area Protocol (CBBAP) a été proposé pour les réseaux corporels sans fils [Alghamdi, 2016]. L'aspect principal de ce protocole consiste à améliorer l'efficacité énergétique globale par rapport aux approches existantes, la consommation d'énergie de ce réseau dépend de la distance de transmission. Le système est divisé en trois modèles : le modèle du système, le modèle réseau et le

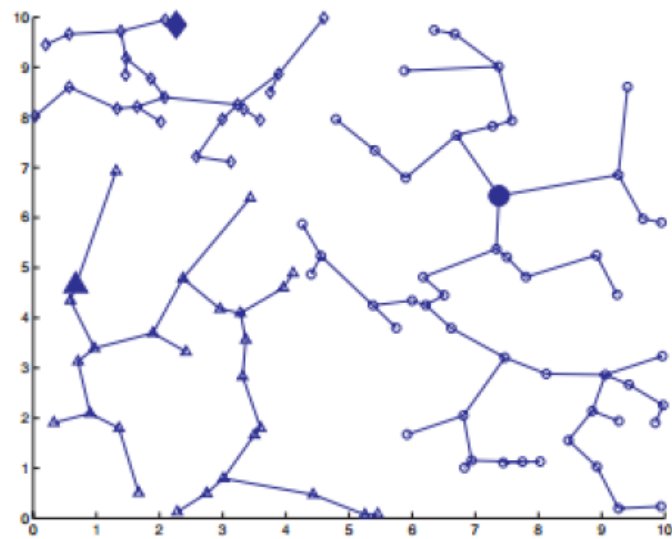


FIGURE 4.4 – Exemple du protocole HIT

modèle énergétique, avec l'utilisation d'une station de base éloignée, une passerelle placée au centre de la zone de détection et différents groupes. La passerelle reçoit toutes les informations et les envoient à la station de base. La Figure 5 montre le modèle du système de ce réseau.

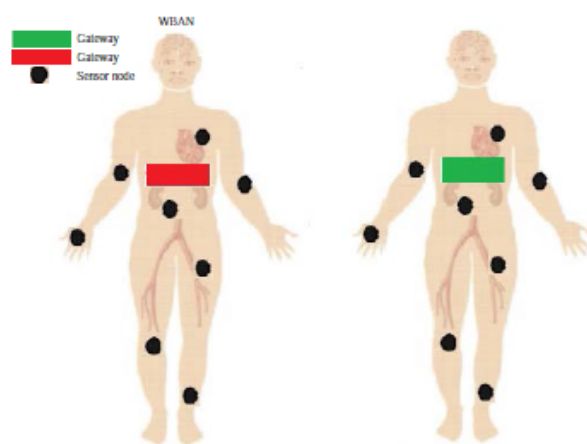


FIGURE 4.5 – Le modèle du système du protocole CBBAP

4.7.2.2 *Algorithme probabiliste (Probabilistic algorithms) :*

Concernant la classe des algorithmes probabilistes, les protocoles de routage probabiliste mettent à jour périodiquement leur « cost function » en fonction des informations de l'état de chemin, afin d'établir leur chemin avec un coût minimum. Donc, ces protocoles nécessitent un grand nombre de transmissions pour la mise à jour de leur information sur l'état des chemins. Le protocole Energy Efficient Thermal and Power Aware routing algorithm (ETPA) a été proposé par Movassaghi et al [Movassaghi et al., 2012]. Ce protocole calcule la « cost function » pour l'allocation des routes en se basant sur la température et l'énergie des noeuds ainsi que la puissance reçue des noeuds adjacents. ETPA a montré que la faite de diminuer l'élévation de température et la consommation énergétique permet une utilisation plus efficace des ressources disponibles. De plus, ce protocole garanti une communication plus durable entre les noeuds du réseau grâce à son temps d'épuisement qui est considérablement élevé. Les mouvements corporels sont pris en compte lors de la conception d'un protocole de routage [Maskooki et al., 2011] et cela à travers un schéma opportuniste qui assure une probabilité de communication élevée avec la station de base durant tout le temps. Par conséquent, il définit deux scénarios de communication entre le noeud et la station de base. D'une part, lorsque le poignet est à l'arrière du corps, sans aucune visibilité directe, la communication est considérée à l'endroit où le noeud envoie les données au noeud relais, puis à la station de base. Tandis que, lorsque le poignet est à l'avant, la communication entre le noeud et la station de base est considérée en visibilité directe. Liang et al [Liang et al., 2012] quant à eux ils ont proposé un protocole distribué pour les réseaux corporels sans fils, Prediction and Secure Routing (PSR) ; concernant ce protocole, chaque noeud maintient une matrice, de cette façon, le protocole stocke les liens de mesure de qualité entre le noeud en question et tous les autres noeuds du réseau durant les intervalles de temps passés, sachant que ces intervalles sont un paramètre prédéfini.

4.7.2.3 *Cross layer algorithm*

La troisième classe regroupe les protocoles de routage combinant les défis de la couche réseau avec d'autres couches. Même si ces protocoles ont une faible consommation énergétique ainsi qu'un débit élevé et fixe de bout en bout, ils ne peuvent pas fournir de hautes performances avec la perte de trajectoire et le mouvement du corps élevés. Leur idée principale est la disponibilité des informations à tous les niveaux de la pile protocolaire pour améliorer la durée de vie du réseau et cela en équilibrant la consommation d'énergie dans le processus de transmission. Ce type de protocole tente d'utiliser d'une façon équitable tous les noeuds de transmission. Parmi les protocoles de routage « cross layer » on trouve le Wireless Autonomous Spanning tree Protocol (WASP) [Braem et al., 2006] qui est basé sur les intervalles de temps et les arbres couvrant (spanning tree en anglais) pour minimiser la consommation énergétique ainsi que les retards. Donc pour transmettre les données à la station de base cela consiste que chaque noeud utilise la stratégie WASP qui consiste à utiliser la stratégie des arbres couvrant en incorporant le routage MAC et en prenant en

considération le trafic de routage, pour transmettre à ces noeuds enfants afin de les informer des intervalles vides, en utilisant la même stratégie les noeuds enfants répondent leurs parents. On a aussi le protocole Cascading Information retrieval by Controlling Access with Dynamic slot Assignment (CICADA) [Singelée et al., 2008] qui est une amélioration du protocole WASP. L'objectif de ce protocole est de créer un réseau multi sauts sans fils, c'est-à-dire un arbre couvrant qui est configuré de manière autonome et le cycle de contrôle et de données sont utilisés collectivement pour réduire les retards et améliorer l'efficacité énergétique tout en préservant la flexibilité du réseau. On a également le Cross Layered Broadcast Protocol (CLBP) [Badreddine and Potop-Butucaru, 2017] qui est conçu pour la mobilité et les topologies multi sauts. Il gère à la fois le processus de diffusion et l'accès au support de contrôle. Ce protocole utilise une phase de prétraitement pour inclure les spécificités du modèle du canal dans le processus de diffusion ; après la phase de prétraitement, le paquet de diffusion de la station de base va contenir les informations de contrôle ainsi que les données.

4.7.2.4 Algorithme basé sur la température (*Temperature based algorithms*)

Les signaux radio générés par les communications sans fils créent des signaux de champs électriques et magnétiques. L'exposition à ces champs conduit à une absorption de rayonnement, ce qui entraîne une élévation moyenne de la température du corps humain [Tang et al., 2005a]. Le flux sanguin sera aussi réduit et les organes sensibles peuvent faire face à de graves dommages thermiques ; plus spécifiquement, une élévation prolongée de la température de la peau corporelle entraîne des dégâts au niveau de la peau, une réduction de sang pour certains organes et des réactions à effet enzymatiques [Bag and Bassiouni, 2008a]. Des algorithmes de routage peuvent être utilisés afin de réduire les effets indésirables qui peuvent parvenir sur ou autour du corps humain. L'une des solutions existantes est le protocole Thermal Aware Routing Algorithm (TARA) [Tang et al., 2005a] ce protocole essaye de réduire les températures en utilisant des algorithmes de contrôle et en limitant la puissance de transmission et cela en équilibrant la communication entre les noeuds. Il essaye d'acheminer les données dans les zones à basse température plus spécifiquement, les paquets sont retirés des zones à haute température et redirigés à travers des chemins alternatifs. Dans les cas où le nombre de sauts atteint trois, le chemin de routage le plus court sera sélectionné via l'algorithme de routage proposé. On peut conclure que le protocole TAR ne prend pas en compte la fiabilité et présente un taux de perte des paquets trop élevé ainsi qu'une durée de vie réduite. Les améliorations apportées à ce protocole ont été attribuées au protocole Least Temperature Routing (LTR) et Adaptive Least Temperature Routing (ALTR) [Bag and Bassiouni, 2006], qui réduisent le nombre de sauts et de boucles non pertinentes en maintenant une liste des noeuds récemment visités. Dans le cas où le nombre prédéterminé de sauts est atteint, le protocole ALTR passe au chemin le plus court afin d'éviter la consommation énergétique. Une autre amélioration est Least Total Route Temperature (LTRT) [Takahashi et al., 2008] qui est une combinaison du chemin le plus court et LTR, dans laquelle la température des noeuds

est traduite en poids de graphe menant à des routes à température minimale. Grâce à ce protocole une meilleure efficacité énergétique et une température basse sont obtenues. L'inconvénient majeur est la surcharge vue que chaque noeud a besoin de connaître la température de tous les autres noeuds. Nous avons aussi l'algorithme Hotspot Preventing Routing (HPR) [Bag and Bassiouni, 2008a] qui est un algorithme de routage destiné aux réseaux biomédicaux et spécialement aux applications sensibles aux retards, comme par exemple la surveillance médicale. Il vise à réduire le temps moyen de transmission des paquets et évite la formation des hotspot. HPR choisit la route avec un nombre minime de sauts de l'émetteur à la destination sauf si un hotspot existe dans ce chemin. L'algorithme de routage pour les réseaux biomédicaux homogènes et sans Id (RAIN : Routing Algorithm for network of homogeneous and id-less biomedical sensor nodes) est plus tolérant aux pannes et fonctionne efficacement d'après les chercheurs même en cas d'épuisement de plusieurs noeuds en raison d'un manque d'énergie [Bag and Bassiouni, 2008b]. Un autre protocole de routage basé sur la température est le Thermal Aware Shortest Hop Routing (TSHR) [Movassaghi et al., 2013] conçu spécialement pour les applications nécessitant une priorité élevée pour la transmission d'un paquet à la destination.

4.7.2.5 *Algorithme de routage basé sur la qualité de service (QoS based routing algorithms)*

La dernière classe de classification des protocoles de routage des WBANs est les protocoles de routage basé sur la qualité du service, et qui fournissent principalement un système d'approche modulaire en présentant des modules distincts pour différentes métriques de qualité de service et qui fonctionnent en coordination, les unes avec les autres. Les modules utilisés dans cette méthode sont le module d'efficacité énergétique, de fiabilité sensible, de délai ainsi que de voisinage. Par conséquent, ces approches fournissent une grande fiabilité, un délai réduit et un taux de livraison de paquets élevés. Mais principalement ces protocoles souffrent de haute complexité due à la conception de plusieurs modules basés sur différentes métriques de qualité de service. Le LOCALMOR est un nouveau protocole qui a été proposé [Djenouri and Balasingham, 2009] pour les applications biomédicales des réseaux corporels sans fils. Il fonctionne d'une manière localisée, distribuée et ayant une mémoire efficace. Il classifie le trafic des données en plusieurs catégories en se basant sur les métriques de qualité de service requises, sachant que différentes techniques et métriques de routage sont fournies pour chaque catégorie. D'autres chercheurs [Razzaque et al., 2011] ont proposé le protocole DMQoS qui est Data centric Multiobjective QoS-aware routing protocol. Ce protocole fournit des services de qualité personnalisés pour chaque catégorie de trafic en se basant sur le type des données générées. Il emploie un design modulaire composé de différentes unités qui opèrent en coordination les uns les autres pour supporter différents services de qualité. Un autre protocole a été basé sur l'apprentissage par renforcement des services de qualité [Liang et al., 2008] qui est Reinforcement Learning based Routing Protocol with QoS support (RL-QRP). Il utilise l'idée de base des informations de localisation. Les noeuds peuvent calculer les routes

ayant une bonne qualité de service en fonction des qualités de liaison des routes disponibles ainsi en fonction des exigences de qualité de service des paquets de données puis transférer les paquets des données à l'un des noeuds voisins. Cette procédure se poursuit lors de la transmission des paquets de données à la station de base et elle est répétée jusqu'à ce que les paquets arrivent à leur destination finale. Les chercheurs Liang et al [Liang and Balasingham, 2007] ont proposé un autre protocole de routage qui prend en compte la qualité de service pour les réseaux biomédicaux et qui a comme but de fournir une prise en charge différentielle de la qualité de service ainsi qu'un service de routage prioritaire sur le réseau. Cette procédure est accomplie à travers les tâches suivantes : établissement et maintenance des routes, priorité des paquets routés, une interface d'application programmable (API).

Deuxième partie

Application et Adaptation de notre
approche d'optimisation énergétique
des RCSF dans le domaine médical

Malgré le grand succès des réseaux corporels sans fils, de nombreux problèmes demeurent toujours, comme nous avons mentionné au niveau des défis des WBANs, la chose qui influence sur les résultats des simulations. Nous avons aussi les biocapteurs qui doivent s'adapter aux différents modes : actif, en veille, réception, transmission en fonction de la topologie et le rôle de chaque noeud. Toutes ces opérations consomment énormément d'énergie des batteries des biocapteurs et nous devons gérer ces opérations afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Dans notre travail nous avons essayé d'adapter notre approche d'optimisation d'énergie aux réseaux corporels sans fils.

4.8 Terminologies utilisées dans notre étude

Quelques terminologies de base que nous avons utilisées dans notre travail :

- **Groupe** : C'est un petit groupe qui contient un ensemble de noeuds selon des critères spécifiques.
- **Chef de groupe (CH)** : Un chef de groupe est élu dans le processus de formation de groupe et chaque groupe doit avoir un seul chef de groupe.
- **Membre du groupe** : Tous les noeuds du groupe sauf le chef du groupe sont appelés noeuds membre du groupe.
- **Noeud passerelle** : Chaque noeud que le chef de groupe peut utiliser pour communiquer avec la station de base s'appelle un noeud passerelle.
- **Agrégation de données** : C'est un moyen pour réduire la consommation d'énergie, vu que les données collectées des biocapteurs sont dérivées d'un phénomène commun donc les signes vitaux capturés dans des intervalles de temps proches partagent fréquemment des informations similaires.
- **Période de stabilité** : C'est l'intervalle de temps depuis que notre système débute jusqu'à la mort du premier noeud dans le réseau.
- **Période d'instabilité** : L'intervalle de temps depuis la mort du premier noeud du réseau jusqu'à la mort du dernier noeud du réseau.
- **La durée de vie du réseau** : C'est lorsque le réseau est opérationnel, il peut être défini comme l'intervalle de temps durant lequel le réseau peut effectuer des opérations dédiées.

4.9 Vue sur l'ensemble de notre protocole

Dans cette section, nous proposons un nouveau protocole de routage pour les réseaux corporels sans fils appelé WBANP (Wireless Body Area Network Protocol). Dans notre protocole nous avons supposé que les biocapteurs sont déployés dans le corps humain mais il est difficile de les recharger ou de les remplacer fréquemment. Les données sont acheminées à leur destination en utilisant une topologie multi sauts. Notre protocole minimise la consommation énergétique et maximise la durée de vie de notre réseau afin d'améliorer sa stabilité. Nous avons introduit le concept du noeud passerelle qui sert

comme un point d'accès entre les différents noeuds et la station de base, il a comme rôle de collecter les informations et les envoyer à la station de base. La description de notre protocole est expliquée en détails dans les sous sections suivantes.

4.9.1 Le modèle adopté par notre système

Dans ce travail, nous avons déployé 8 biocapteurs sur un corps humain pour capturer les modifications de l'état du patient surveillé selon la fonction de chaque capteur implanté ; les noeuds biocapteurs convertissent les signes physiologiques en signaux électriques à transmettre au serveur médical, ce qui peut être utilisé pour la surveillance ou le suivi de patient en évitant son déplacement à chaque fois à l'hôpital. Tous les noeuds biomédicaux ont la même énergie initiale ainsi que les mêmes capacités de calcul. Nous considérons deux types de biocapteurs dans notre approche, noeuds de surveillance périodique et noeuds de surveillance selon un seuil déterminé. Concernant ce dernier type, lorsqu'un seuil spécifique est atteint, les données doivent être envoyées immédiatement. Par exemple, les données seront transférées lorsque la température du corps humain dépasse les 40 °C ou si elle est inférieure à 35°C, ce qui signifie que le patient est dans une situation critique et nécessite un suivi médical. Un autre exemple, est le niveau de la glycémie, le seuil critique bas est de 110mg/dl et le seuil élevé est de 125mg/dl, ces valeurs illustrent les conditions du diabète chez les patients, et le responsable médical doit être alerté pour prendre les mesures nécessaires. Pour les noeuds de surveillance périodique, les capteurs biomédicaux surveillent périodiquement les paramètres comme la tension, les fréquences cardiaques, les mouvements du patient. Le nouvel aspect de la topologie proposée est l'utilisation d'un noeud passerelle, qui est le gateway body sensor en anglais. Cette solution permet de réduire la consommation énergétique car tous les noeuds communiquent avec la station de base à travers ce noeud qui s'occupe d'agrégier toutes les données reçues et les envoyer à la station de base. Ce noeud passerelle possède des ressources énergétiques plus élevées que les autres capteurs corporels, à mentionner que ce noeud est attaché au niveau de la taille du patient.

4.9.2 Les étapes adoptées par notre système

Les réseaux corporels sans fils ont généralement une faible énergie au niveau de leur biocapteur ; ces derniers doivent fonctionner le plus longtemps possible afin d'éviter leur remplacement qui nécessite des opérations chirurgicales s'ils sont implantés. Donc l'efficacité énergétique est une condition essentielle pour un tel type de réseau, afin de maximiser sa durée de vie. Aussi pour un acheminement de données fiable, les protocoles de routage utilisés doivent sélectionner le chemin ayant une distance minimum. Nous avons conçu notre approche en tenant en considération ces points essentiels. La première étape dans notre système est le déploiement des biocapteurs au niveau du corps humain selon la fonctionnalité de chacun d'entre eux, il s'agit d'une décision médicale et non automatique. Chaque capteur médical est caractérisé par un identifiant de noeud (ID), un type,

une localisation sur le corps et une énergie initiale E_0 . Dans ce chapitre nous proposons un protocole de routage multi sauts afin d'économiser l'énergie de notre réseau avec l'utilisation du noeud passerelle et les chefs de groupes. L'élection des chefs de groupes est effectuée à chaque itération, nous calculons une fonction spécifique, et sur la base de cette fonction calculée chaque noeud décide s'il va devenir un chef de groupe ou non. Le noeud ayant une valeur maximale de cette fonction calculée (étape 6 : calcul de la fonction dans l'algorithme 4.1) devient chef de groupe. Cela signifie que le noeud ayant une distance minimale au noeud passerelle (D) et une énergie maximale (E) devient chef de groupe. Tous les autres noeuds et en fonction de leur type transmettent les données au chef de groupe, qui s'occupe de l'envoi des informations reçues au noeud passerelle qui les achemine à son tour à la station de base après qu'il les a agrégé.

4.9.3 Modèle énergétique

Nous rappelons qu'une communication multi-sauts a été adoptée pour réduire la consommation énergétique dans notre réseau. Vu qu'une grande partie de l'énergie est perdue lors des transactions de réception et transmission. Nous avons opté dans notre système à envoyer les données à la station de base par le biais du noeud passerelle. L'idée principale est de combiner les données des différents capteurs afin d'éliminer les redondances lors des transmissions et réduire le nombre de données transmises. Le modèle de l'énergie consommée lors de la transmission est le suivant :

$$E_{Tx}(k, d) = k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^m \quad (4.1)$$

Avec :

- E_{tx} : L'énergie consommée lors de la transmission.
- E_{amp} : L'énergie requise pour le circuit de l'amplificateur.
- k : La taille du paquet.
- m : L'exposant de perte au niveau du corps humain.

Et pour recevoir un message :

$$E_{R(k)} = k \times E_{elec} \quad (4.2)$$

Avec :

E_{rx} : L'énergie consommée par le récepteur.

4.9.4 Fonctionnement du protocole : le flux de communication

La détection, la réception, l'agrégation, le traitement et la transmission sont les principales opérations des noeuds au niveau de notre réseau, et cela en fonction de leur type et leur énergie. Durant la conception du WBANP, parmi les problèmes les plus importants que nous avons pris en considération est le problème énergétique ; nous avons la contrainte d'avoir une consommation énergétique basse sans oublier que le réseau doit être évolutif.

Algorithme 4.1 Flux de Communication

Définir : l'énergie des Biocapteurs $S(i).E$, Le type des Biocapteurs $S(i).P$, Le nombre des Biocapteurs n , Distance entre les Biocapteurs et le Noeud passerelle $distance$, Fonction d'élection $Funct$, x-axis position des noeuds $S(i).xd$, y-axis position des noeuds $S(i).yd$, Noeud passerelle Gb , Chef de Groupe ch .

Début

Etape 1 : Création du réseau (Inclue les biocapteurs normaux et le noeud passerelle)

Etape 2 : Assigner l'énergie initial aux biocapteurs

Etape 3 : Vérification Energétique

Pour $i=1$ **to** n **Faire**

Si $S(i).P \leftarrow 0$ **Alors**

$dead \leftarrow i$
 $n \leftarrow n - dead$

Finsi

Fin pour

Etape 4 : Vérification du Type des Biocapteurs

Pour $i=1$ **to** n **Faire**

Si $S(i).P \leftarrow 1$ **Alors**

$X_0(a) \leftarrow S(i).id$ // Ajouter ID au Tableau X_0
 $a \leftarrow a + 1$

Finsi

Si $S(i).P \leftarrow 2$ **Alors**

$X_1(b) \leftarrow S(i).id$ // Ajouter ID au Tableau X_1
 $b \leftarrow b + 1$

Finsi

Fin pour

Etape 5 : Mesure de la distance entre les biocapteurs et le noeud passerelle

Pour $i=1$ **to** n **Faire**

$distance \leftarrow \sqrt{(S(i).xd - (Gb.x))^2 + (S(i).yd - (Gb.y))^2}$

Fin pour

Etape 6 : Calcule de la Fonction

Pour $i=1$ **to** n **Faire**

Si $S(i).E > 0$ **Alors**
 $Funct(i) \leftarrow S(i).E / distance(i)$

Finsi

Fin pour

Etape 7 : Election du Chef de groupe

Pour $i \leftarrow 1$ **to** $length(X_0)$ **Faire**

$Max(Funct) \leftarrow i$
 $i \leftarrow Nominatedclusterhead$

Fin pour

Etape 8 : Transmission des Données

Pour $i=1$ **to** n **Faire**

Si $S(i).E > 0$ et $S(i).P = 2$ **Alors**

$Packet_to_Gb \leftarrow Packet_to_Gb + 1$ // Transmission Direct au noeud
 passerelle

Finsi

Si $S(i).E > 0$ et $S(i).P = 1$ **Alors**

$Packet_to_ch \leftarrow Packet_to_ch + 1$ // Transmission Direct au chef de
 groupe

Finsi

 Transmission des données du chef de groupe vers le noeud passerelle

Fin pour

Fin

Notre protocole WBANP est conçue pour assurer une surveillance médicale des patients, les biocapteurs capturent toutes les données importantes et les envoient au noeud passerelle, qui à son tour les collecte et les transfère ensuite à leur destination appropriée. Les différentes étapes de notre protocole WBANP sont expliquées en détails dans l'algorithme 4.1 :

Cette séquence d'étapes, détaillée dans l'algorithme, peut être assemblée dans un organigramme tel qu'il est montré dans Figure 4.6. L'organigramme schématise comment les données circulent de leur source vers leur destination en fonction des itérations du système.

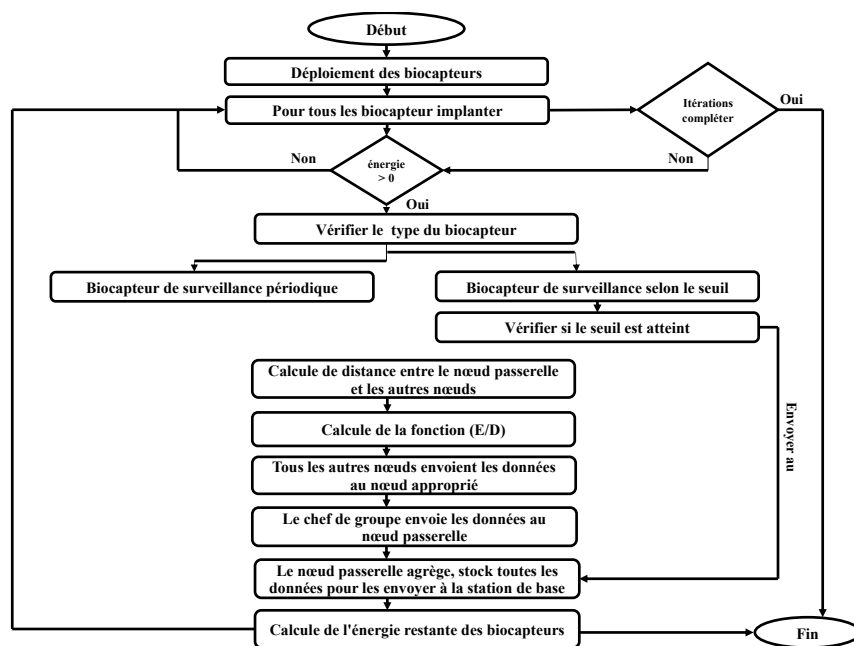


FIGURE 4.6 – WBANP organigramme

4.10 Simulation et Résultats

4.10.1 Paramètres de Simulation

Au niveau de cette section, nous allons évaluer, par la simulation, la performance de notre protocole WBANP présenté précédemment. L'objectif principal de ce travail était de développer un protocole de routage pour les réseaux corporels sans fils afin de transférer les données sur un réseau avec une consommation énergétique minimale et une longue durée de vie du réseau. Nous allons comparer notre schéma avec deux protocoles existants. Les auteurs L.Qing et al ont proposé et évalué un nouveau protocole appelé Distributed Energy Efficient Clustering schema (DEEC) [Qing et al., 2006] ; ce protocole permet à chaque noeud de dépenser de l'énergie d'une manière uniforme, en faisant une rotation

du rôle de chef de groupe entre tous les noeuds du réseau. Dans ce protocole, les chefs des groupes sont choisis selon une probabilité basée sur le rapport entre l'énergie résiduelle de chaque noeud et l'énergie moyenne du réseau. Le nombre des itérations des rotations dans le système varie selon l'énergie initiale des noeuds et leur énergie résiduelle. Le deuxième protocole est Adaptive Threshold based Thermal aware Energy efficient Multi hop protocol (ATTEMPT) [Sharma et al., 2015] qui est désigné spécifiquement pour les réseaux corporels sans fils, concernant le fonctionnement de ce protocole, pour économiser l'énergie, les noeuds augmentent et diminuent leur rang de transmission pour les communications à sauts multiple et à saut unique. Si deux itinéraires sont disponibles, le chemin sélectionné est celui ayant le moins de saut, et si les deux chemins ont le même nombre de saut, le chemin qui va consommer le moins d'énergie vers la station de base, sera sélectionné. Pour étudier les performances des réseaux, les simulations ont été réalisées à l'aide de l'outil Matlab R2012 32bits. Le traitement a été fait sous Intel i5-2450 à 2.5GHz, avec 4 Go de RAM. Dans notre simulation, pour surveiller l'état de santé d'un patient, on a 8 capteurs biomédicaux implantés dans un corps humain sans aucun mouvement, et collectent les données physiologiques du patient tels que ECG, pulse, blood, *etc.* Dans notre scénario, nous avons défini un champ à 2 dimensions de 1.8m sur 0.8 qui va être utilisé. En prenant en considération, le fait que tous les noeuds sont fixés selon des coordonnées (x,y) spécifiques défini selon le fonctionnement de chaque capteur biomédical, avec une énergie initiale $E_0=0.5J$. Le noeud passerelle est attaché au niveau de la taille du patient. Les paramètres de simulations sont présentés au niveau du Tableau 4.4. Afin que les résultats des protocoles puissent être comparés, tous les protocoles ont été simulés pour le même modèle radio des noeuds et en fonction de nos paramètres.

TABLE 4.4 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
La taille du réseau	1.8 * 0.8 mètre
Nombre de noeuds	8
Type de déploiement	Fixe
Localisation du Noeud passerelle	1 *0.45 mètre
Energie initiale	0.5 joules
Nombre d'itération	8000 itérations

4.10.2 Résultats de Simulation

Afin d'évaluer les performances et l'énergie de notre protocole nous avons utilisé les métriques suivantes :

4.10.2.1 Nombre des noeuds perdus

Réduire au minimum la consommation d'énergie est notre première contrainte lors de la conception de notre protocole pour les réseaux corporels sans fils qui est difficile à réaliser. Nos premiers résultats concernent le nombre de noeuds perdus par itération. Le premier noeud perdu est considéré comme le paramètre majeur pour analyser la durée de vie du réseau. Et en analysant le nombre des noeuds perdus par itération, on peut décider et donner notre avis sur la durée de vie du réseau. Un noeud perdu est un noeud qui a épuisé toute son énergie, et il n'est plus apte à réaliser les opérations de détection ni participer dans le routage des données. Dans cette sous-section, pour vérifier l'efficacité et mesurer les performances de notre protocole WBANP, une étude comparative avec DEEC et ATTEMPT protocole a été effectuée.

La simulation montre que les trois graphiques restent stables jusqu'au niveau de l'itération 2200 environ, le protocole ATTEMPT perd son premier noeud. Contrairement au protocole DEEC qui a pu conserver l'énergie de ses noeuds jusqu'au niveau de l'itération 3800 où le premier noeud est perdu. Concernant notre protocole WBANP, le graphe est maintenu dans un état relativement bon, jusqu'au niveau de l'itération 4991 où le premier noeud est perdu, comme le montre la Figure 4.7.

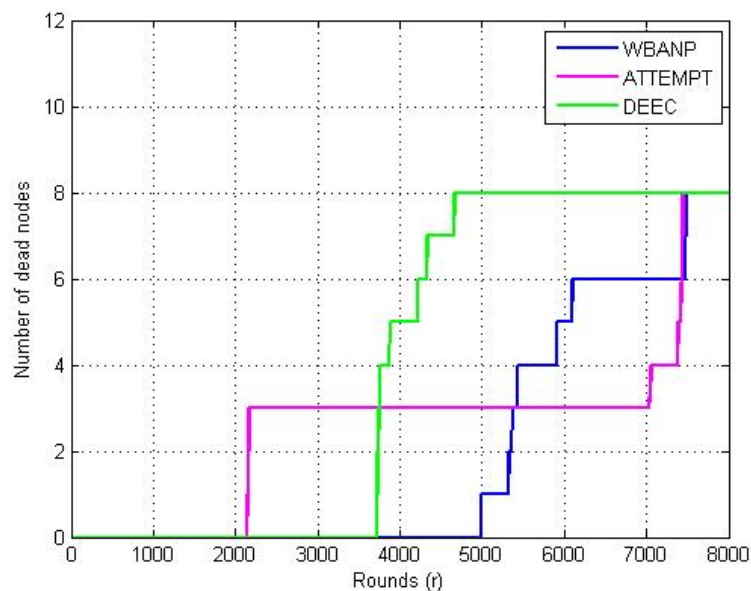


FIGURE 4.7 – Nombre de noeuds perdus par itération

4.10.2.2 Nombre des noeuds actifs

La deuxième métrique adoptée est le nombre de noeuds actifs dans le réseau ; également appelée période de stabilité, et elle est définie comme étant la durée de vie du réseau

où tous ses noeuds sont actifs. Dans de nombreux cas, il est nécessaire que tous les noeuds du réseau restent actifs le plus longtemps possible.

La Figure 4.8, illustre le nombre de noeud actif par itération pour les trois protocoles. Il est clair au niveau de la figure que pour notre protocole WBANP tous les noeuds ont pu garder leur énergie jusqu'au niveau de l'itération 4900 ; puis au niveau de l'itération 4991, le graphe connaît une petite variation due à la perte d'un premier noeud. Tandis que pour le protocole ATTEMPT, ses noeuds ont perdu leur énergie un peu tôt, du coup son graphe n'est plus stable, vu qu'au niveau de l'itération 2200 ce protocole a perdu son premier noeud. Enfin, concernant le protocole DEEC, il a pu maintenir un peu plus ces noeuds vivants, jusqu'au niveau de l'itération 3800 où il a perdu son premier noeud. Donc sur la base des résultats obtenus au niveau de la Figure 4.8, on peut conclure que notre protocole WBANP offre une stabilité plus longue par rapport aux autres protocoles.

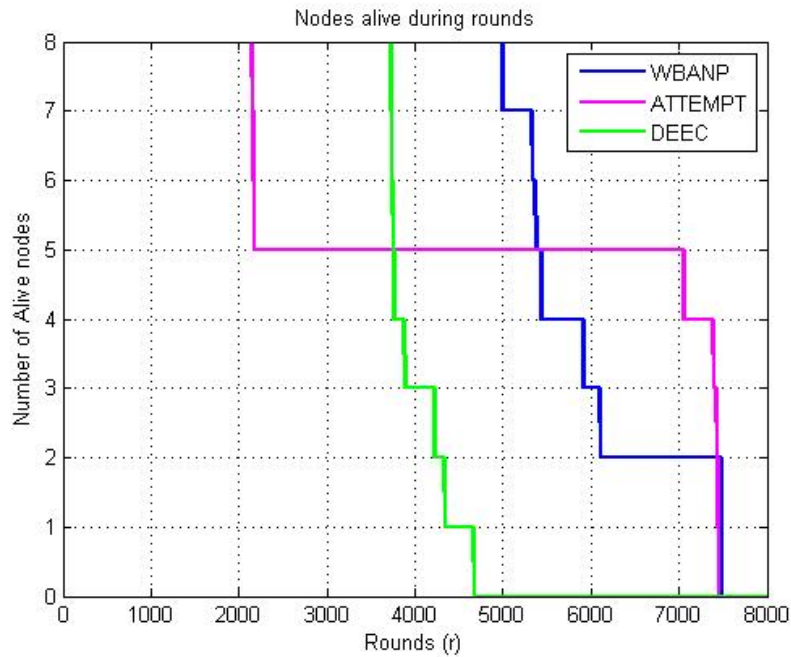


FIGURE 4.8 – Nombre de noeuds actifs par itération

4.10.2.3 Énergie Résiduelle

La troisième métrique choisie comme critère d'analyse de performance du protocole est l'énergie résiduelle. Pour transférer les données collecter à la station de base, le protocole à sauts multiple proposé utilise plusieurs étapes dans chaque itération pour économiser de l'énergie. La moyenne de l'énergie consommée au niveau de chaque itération est présentée dans la Figure 4.9. Les résultats de simulation montrent que notre protocole proposé WBANP est plus performant et consomme une énergie minimum lors de 65% à 70% du temps de simulation, ce qui est représenté au niveau de l'itération 4800. Cela signifie,

que durant la période de stabilité, les noeuds ont suffisamment d'énergie, donc ils transmettent plus de paquets à la station de base même si l'approche ATTEMPT réduit la consommation énergétique.

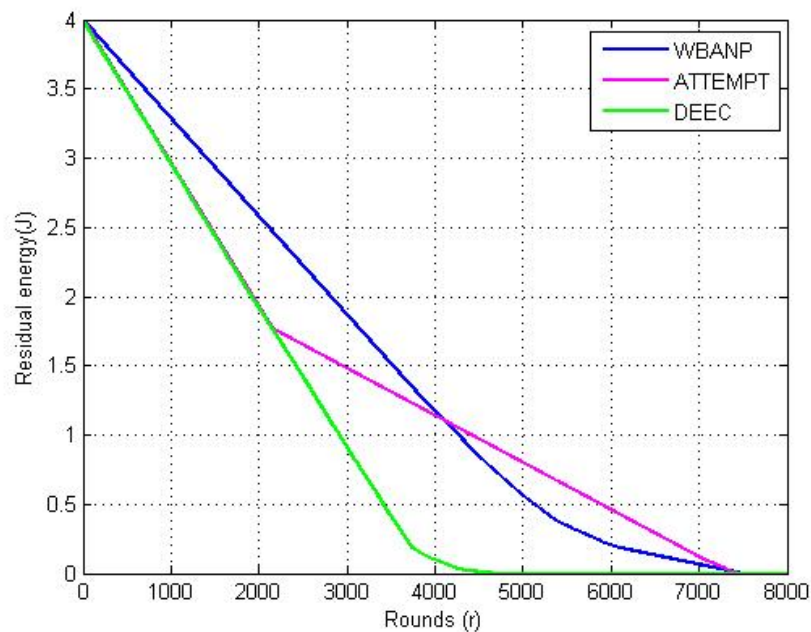


FIGURE 4.9 – Energie résiduelle

D'après les résultats des expériences, nous pouvons constater que notre protocole WBANP a toujours présenté les meilleurs résultats au niveau des trois métriques. Nous avons conclu que le protocole WBANP est plus performant pour la minimisation de la consommation énergétique et il a pu augmenter la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles DEEC et ATTEMPT.

4.11 Synthèse

Les protocoles de routage pour les réseaux corporels sans fils constituent une très bonne infrastructure pour la transmission des données et représentent de nombreux avantages en termes de consommation énergétique et durée de vie du réseau. Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner une vue globale sur ces réseaux, et nous avons traité l'un des principaux défis de ces réseaux, le problème de l'énergie. Nous avons proposé un nouveau protocole pour les WBANs, en utilisant le concept du noeud passerelle qui a comme rôle de router les données à leur destination finale. Dans un tel réseau, les contraintes les plus importantes à prendre en considération sont la faible consommation énergétique ainsi que la qualité des informations envoyées sur le réseau. Nous avons comparé notre schéma

avec deux méthodes existantes dans la littérature, et nous avons obtenu des résultats satisfaisants en termes de stabilité et de durée de vie des réseaux.

Vu que nous nous intéressons au domaine médical, la qualité des informations transmises joue un rôle très important sur la fiabilité de notre réseau, c'est l'une des contraintes à prendre en considération à côté de la consommation énergétique. Donc pour nos travaux futurs, nous avons pensé à augmenter le nombre de noeuds implanter sur le corps humain et tester une nouvelle fois l'efficacité de notre approche mais cette fois en effectuant quelques modifications au niveau de la conception du système qu'on va expliquer en détails au niveau des sections suivantes.

Troisième partie

Contribution à l'amélioration de l'approche appliquée au domaine médical

4.12 Introduction

Les réseaux corporels sans fils font partie d'un domaine qui nécessite de plus en plus une attention particulière, de nombreuses applications ont été développées à l'aide de ces réseaux dans le domaine médical et non médical. Dans notre travail actuel nous avons conçu un protocole de routage pour les réseaux corporels sans fils qui vise à surveiller les signes physiologiques des patients, tout en minimisant la consommation énergétique pour maximiser la durée de vie du réseau ainsi en tenant en compte de la qualité d'information envoyée dans le réseau comme nous avons déjà expliqué précédemment. Le protocole de communication utilisé dans notre réseau permet d'acheminer les données efficacement tout en économisant l'énergie. Dans ce qui suit nous allons commencer par détailler le problème et donner plus de détails sur notre solution.

4.13 Présentation du Problème

Les WBANs sont l'une des applications des RCSF les plus utilisés. Ils sont généralement appliqués pour surveiller la santé humaine, et cela en implantant ou en positionnant des biocapteurs sur le corps du patient afin de faciliter son suivi ainsi que l'intervention médicale du personnel surtout dans les cas critiques. Les informations mesurées par les biocapteurs sont transmises au serveur principal ou elles sont accessibles au personnel médical à tout moment. Le principal défi des réseaux corporels sans fils est le problème d'amélioration de la durée de vie du réseau, c'est-à-dire assurer un suivi du patient à long terme. En effet, la durée de vie du réseau est étroitement liée à la consommation énergétique des batteries des biocapteurs, car elles constituent la seule source d'énergie. De plus, il est difficile de recharger les batteries des biocapteurs dans la plupart des cas, vu que ces derniers peuvent être implantés dans le corps humain. Donc l'objectif majeur de ces réseaux est de gérer efficacement leur énergie pour augmenter la durée de vie du réseau et garantir un bon acheminement des informations transmises jusqu'à leur destination. De nombreuses solutions ont été proposées, comme nous avons déjà cité, pour optimiser cette consommation énergétique ; parmi ces solutions, le développement d'algorithmes distribués pour minimiser la consommation énergétique. Au niveau de ce travail, nous avons développé un protocole de routage basé sur le regroupement pour la transmission des données à la station de base. Certains biocapteurs envoient directement leurs données au nœud passerelle et d'autres utilisent un algorithme de regroupement pour assurer la transmission des données vers le nœud passerelle. Nous avons utilisé aussi des algorithmes d'agrégation des données afin de générer de bonnes performances en termes de consommation d'énergie ainsi que qualité d'information.

4.14 Architecture du réseau

4.14.1 Protocole de routage basé sur le regroupement pour les réseaux corporels sans fils (CRPBA)

Le protocole de routage basé sur le regroupement proposé pour les réseaux corporels sans fils est appelé en anglais Clustering Routing Protocol for Body Area network (CRPBA). Il a comme objectif la capture des changements physiologiques dans la santé des patients et cela selon le fonctionnement de chaque biocapteur porté, puis la conversion de ces signes physiologiques en signaux électriques transmissible au serveur médical. Ce protocole CRPBA est une extension de notre protocole proposé WBANP, en augmentant le nombre de biocapteurs utilisés. Dans CRPBA, nous avons déployé 24 capteurs biomédicaux sur un corps humain, comme schématisé sur la Figure 4.10. Au stade initial de notre implémentation, il est supposé que tous les biocapteurs aient la même énergie initiale E_0 . Ici nous avons deux noeuds passerelles, ce qui est différents du premier protocole. Le premier noeud passerelle est placé au niveau de la taille du corps humain pour recevoir les informations des chefs des groupes puis les transmettent à la station de base qui est le serveur médical. Le deuxième noeud passerelle, est attaché au cou du patient pour recevoir les informations urgentes, ce type d'information est reçu des biocapteurs qui envoient leurs trames directement, sans passé par le regroupement, vu que leurs données sont critiques et urgentes. Concernant la station de base, elle est placée à l'extérieur du réseau.

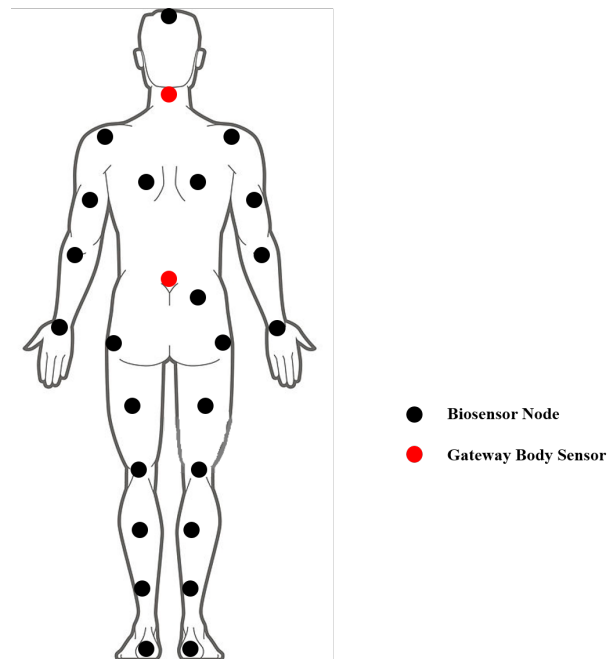


FIGURE 4.10 – le modèle considéré pour notre CRPBA

4.14.2 Modèle du réseau

Afin de maximiser la durée de vie du réseau, la minimisation de la consommation énergétique est la clé majeure. Dans notre système, la première étape consiste à déployer les biocapteurs en fonction de leur fonctionnalité. Chacun d'entre eux est caractérisé par un identifiant unique (ID), un type, un emplacement (x,y) et une énergie initiale. Dans notre protocole CRPBA nous adoptons deux techniques pour transmettre les données à la station de base à travers les noeuds passerelles, comme illustré dans la Figure 4.11.

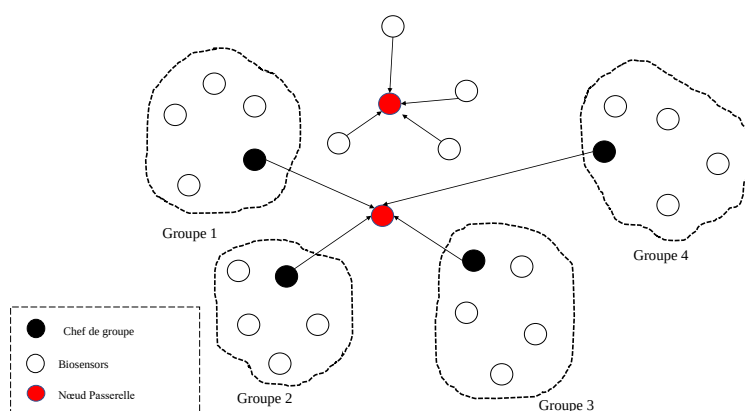


FIGURE 4.11 – Vue sur l'ensemble de notre protocole CRPBA

- **Transmission directe** : Les biocapteurs, ayant des informations critiques, envoient leurs données directement à la passerelle appropriée.
- **Transmission à travers le chef de groupe (CH)** : Les biocapteurs transmettent leurs informations à la passerelle appropriée à travers un algorithme de regroupement. La sélection du chef de groupe est effectuée de manière dynamique lors de chaque itération, le noeud ayant une distance minimale au noeud passerelle et une énergie maximale devient chef de groupe. Cette sélection est basée sur le calcul de la fonction Équation 4.3 suivante :

$$Function(d, E) = \frac{distance}{Energy} \quad (4.3)$$

Puis le chef de groupe collecte les données des noeuds membres, agrège ces données et les transmet au noeud passerelle appropriés, qui s'occupe de les envoyer à la station de base. Concernant le modèle énergétique adopté par ce protocole, c'est le même modèle suivi par notre approche proposé précédemment 4.9.3.

4.15 Simulation et Résultats

Dans cette section, nous essayons d'évaluer les performances de notre protocole CRPBA par des simulations, nous avons implémenté notre protocole CRPBA en utilisant les outils de MATLAB, sous un système d'exploitation Windows 32 bits, l'ordinateur utilisé est doté d'un processeur Intel (R) i5 de 2.5GHz et 4GO de RAM. Pour effectuer le suivi médical du patient et transmettre les données physiologiques, nous avons donc déployé 24 capteurs biomédicaux sur le corps humain pour acquérir les informations. Dans notre simulation, nous avons opté pour un champ à deux dimensions de 1.8 mètre sur 0.8 mètre. Tous les noeuds ont une énergie initiale $E_0 = 0.5$ Joule et sont fixés en fonction des coordonnées (x,y). Dans notre système nous avons deux noeuds passerelles, l'un est fixé à la taille du patient et le deuxième au niveau de son cou ; afin de collecter les données des chefs de groupes et les envoyer à la station de base. Les paramètres utilisés dans la simulation sont indiqués au niveau du Tableau 4.5 :

TABLE 4.5 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Nombre de biocapteurs	24
La taille du réseau	1.8* 0.8 mètre
Emplacement du premier noeud passerelle	1 * 0.40 mètre
Emplacement du deuxième noeud passerelle	1.6 * 0.40 mètre
Energie initiale	0.5 joule
Nombre d'itération	7000 itérations

4.15.1 Analyse de la durée de vie du réseau

La première métrique considérée est le nombre de noeuds morts par itération pour mesurer les performances de notre protocole CRPBA. Notre protocole joue un rôle important pour équilibrer la consommation d'énergie entre les biocapteurs en utilisant le regroupement pour sélectionner les chefs des groupes qui transmettent les données au noeud passerelle approprié. Lors de chaque itération, les chefs des groupes sont sélectionnés en fonction des deux paramètres, l'énergie et la distance. La Figure 4.12 illustre une étude comparative avec et sans l'utilisation du protocole CRPBA. Ce qui veut dire nous avons deux systèmes, un système qui transmet ses données directement à la station de base, qui n'utilise ni le regroupement, ni le noeud passerelle et un autre système qui utilise notre protocole et passe par toutes les étapes citées précédemment pour transmettre les informations à la station de base. Nous remarquons que le premier noeud est perdu au niveau de l'itération 2611 lorsqu'on n'utilise pas le protocole CRPBA ; par contre en l'utilisant, le premier noeud perdu est au niveau de l'itération 3375. Ce qui est intéressant, car

le réseau garde tous ses noeuds opérationnels le plus longtemps possible et cela jusqu'au niveau de l'itération 3370. On peut donc dire que la structure du CRPBA joue un rôle très important dans l'équilibre de la consommation énergétique dans tout le réseau ce qui permet une bonne qualité des données reçues à traiter par le staff médical. A chaque itération, les noeuds consomment une énergie raisonnable, ce qui permet d'avoir une plus longue période de stabilité ainsi qu'une durée de vie plus raisonnable.

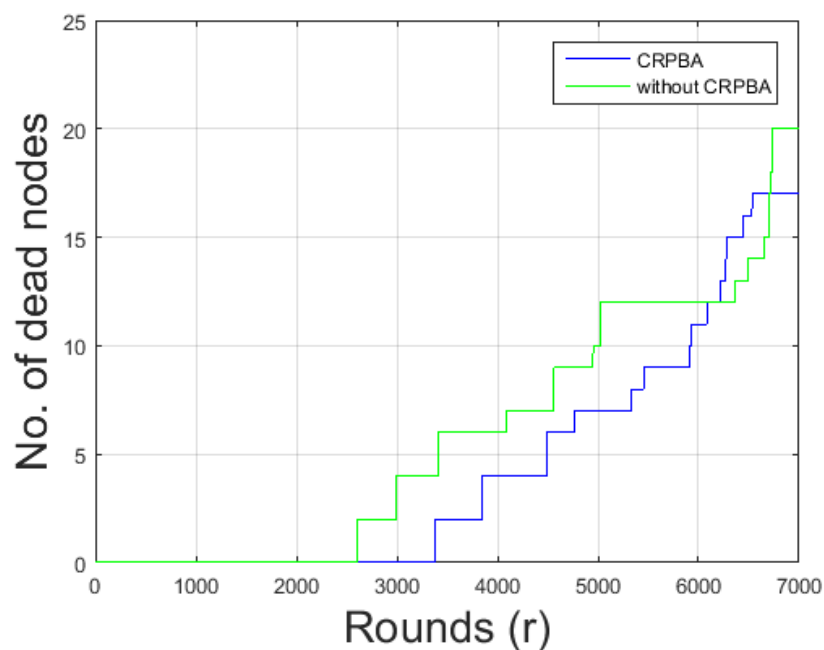


FIGURE 4.12 – Analyse de la durée de vie du réseau

4.15.2 Analyse de l'énergie restante

La Figure 4.13 présente l'énergie moyenne consommée lors de chaque itération en utilisant le protocole CRPBA et sans son utilisation. Notre protocole de routage, basé sur le regroupement, utilise une topologie multi-sauts dans laquelle le biocapteur le plus éloigné transmet ces données à la station de base à travers un nœud passerelle ; celui-ci agrège toutes les informations reçues à partir des chefs de groupe ou lors d'un envoi direct. Les chefs des groupes sont élus en suivant les instructions de sélection des chefs des groupes. En nous basant sur la simulation, nous constatons que l'utilisation de la topologie de CRPBA consomme une énergie minimale allant jusqu'à 60% du temps de la simulation. Donc les nœuds auront suffisamment d'énergie pour transférer leur paquet vers leur destination finale ainsi en minimisant cette énergie un grand nombre de paquet sera transmis, une chose qui influence positivement sur la qualité d'information envoyée dans le réseau et cela en ayant toutes les informations nécessaires pour comprendre et

suivre les états des patients sans aucune ambiguïtés ni complication.

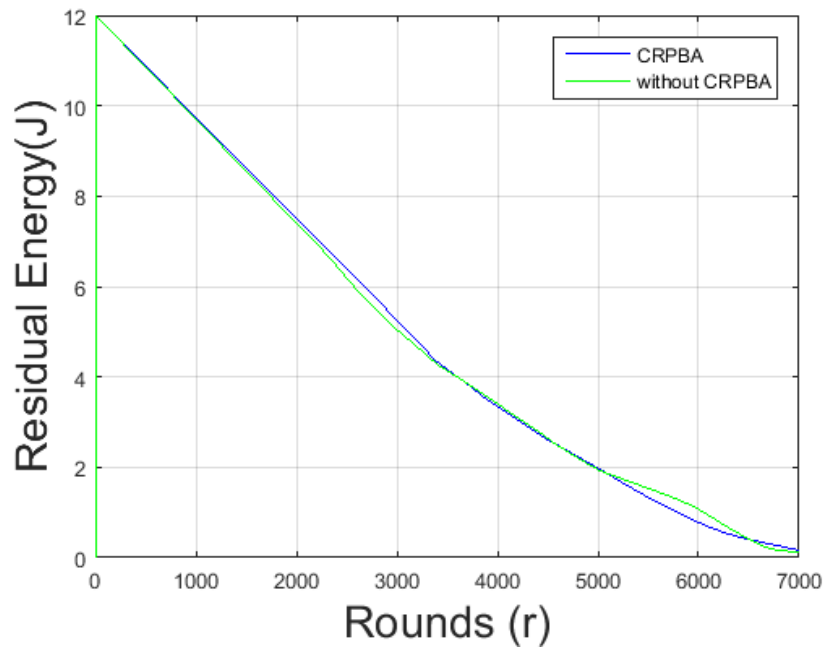


FIGURE 4.13 – Analyse de l'énergie restante

4.16 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par introduire un état de l'art des réseaux corporels sans fils et leurs différentes applications, types, exigences ainsi que caractéristiques. Nous avons enchainé notre chapitre par aborder le point le plus important qui est le routage dans les réseaux corporels sans fils, les défis du routage et la classification des protocoles de routages dans les réseaux corporels sans fils. Puis nous avons poursuivi notre chapitre par l'introduction des terminologies utilisées lors de la conception de nos deux protocoles de routage conçues pour les WBANs et qui ont pour objectif de surveiller l'état de santé des patients pour faciliter leurs vies quotidiennes en évitant leur déplacement à chaque fois à l'hôpital ainsi en diminuant les états de décès imprévus causé par les crises cardiaques par exemple.

Lors de la conception nous avons eu recours à l'utilisation des algorithmes de regroupement, les techniques d'agrégation ainsi que l'utilisation du concept du noeud passerelle pour minimiser la consommation d'énergie et router d'une manière fiable les données vers leur destination finale pour valider leur traitement. Nos protocoles de routage, d'après nos simulations, ont assuré une optimisation robuste de la consommation énergétique ; ce qui aide à augmenter la stabilité du réseau ainsi que sa durée de vie, tous ces résultats sont validés par les simulations.

Pour la suite de notre travail, nous avons opté à découvrir un notre domaine d'application des réseaux de capteurs sans fils qui est les systèmes de transport intelligent, nous nous sommes intéressés à concevoir une approche hybride qui vise à garantir la qualité d'information envoyée dans le système ainsi que la minimisation de l'énergie du réseau, nos deux contraintes majeures lors de la distribution de traitement dans un réseau de capteurs sans fils. Cette approche sera appliquée sur l'iCab qui est une voiture intelligente, nous allons traiter et expliquer ces différents points en détails dans le chapitre suivant.

**PROPOSITION D'UNE APPROCHE HYBRIDE DE COMMUNICATION
V2X POUR LES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENT**

Sommaire

5.1	Introduction	106
5.2	Les systèmes de Transport Intelligent	107
5.2.1	Définition	107
5.2.2	Véhicule autonome connecté	108
5.2.3	Système de communication	110
5.3	Approche de Communication proposée	113
5.3.1	Approche Globale	113
5.3.2	Approche Spécifique	115
5.4	Travail Expérimental	116
5.4.1	Description du Matériel	116
5.4.2	Description du Logiciel	118
5.4.3	Scénario	121
5.4.4	Métrique d'évaluation	123
5.5	Résultats et Discussion	124
5.6	Conclusion	128

5.1 Introduction

Le développement et le déploiement réussi des RCSF dépendent des avancées dans différents domaines tels que : la conception de nouveaux capteurs fiables, des sources de puissance à haute densité énergétique, l'électronique, des dispositifs capables de générer différents environnements et de nouvelles normes de communication. Les domaines d'applications les plus promoteurs des RCSF sont : le transport, la médecine, la surveillance et la protection environnementale, le domaine militaire, l'industrie et bien d'autre.

Les RCSF peuvent être appliqués partout où nous rencontrons des sources d'informations réparties dans l'espace. Dans le chapitre précédent nous avons essayé d'appliquer les RCSF dans le domaine médical pour améliorer la qualité de vie des malades, nous avons conçu un protocole de routage pour la surveillance médicale des patients tout en minimisant la consommation énergétique afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Vue que l'application est dans le domaine médical, les patients nécessitent une surveillance continue, donc une attention particulière doit être donnée à la consommation énergétique parce que les capteurs médicaux doivent rester opérationnelle pendant une longue durée sans être rechargé ou remplacé. Tout cela pour faciliter la vie des patients en évitant leur déplacement fréquent à l'hôpital et leur assurer un suivi médical en temps réel pour prendre les précautions nécessaires lorsqu'il faut intervenir ; ainsi la surveillance à distance des patients permet de diminuer le nombre des morts imprévu, par exemple les morts causés par les crises cardiaques.

Dans ce chapitre nous allons essayer d'exploiter la technologie des RCSF dans un autre domaine différent du précédent, le transport. Spécialement les systèmes de transport intelligent (STI) en anglais intelligent transportation system (ITS). Le transport est un domaine intéressant pour les RCSF, l'un des principaux objectifs des systèmes de transport intelligents est le profit économique sous forme de réduction de consommation de carburant, d'utilisation efficace des infrastructures existantes, diminution de pollution, *etc.* Certes l'objectif économique n'est pas le seul, l'augmentation de la mobilité, la sécurité et le confort des passagers sont d'autres motivations très fortes pour la mise en oeuvre des STI dans la pratique. Un aperçu complet de l'état du système ne peut être obtenue qu'à partir des informations obtenues des capteurs correctement déployés. Et un déploiement réussi des RCSF dans différentes applications dépend des paramètres des noeuds capteurs, parmi les paramètres les plus important : la puissance du traitement et la capacité de la mémoire du capteur, le coût de production, la tolérance aux pannes, la sécurité, la faible consommation d'énergie et une longue durée de vie. Mais il est impossible de développer un réseau en prenant en considération toutes les exigences ci-dessus.

Nous allons nous intéresser à la qualité d'information envoyé dans le réseau pour avoir une bonne réception de message tout en prenant en considération la minimisation de la consommation énergétique et cela par la proposition d'un schéma de communication stable et sécurisé capable de fonctionner dans différentes conditions et contraintes. Dans ce chapitre nous allons proposer une approche de communication hybride pour les

systèmes de transport intelligents en utilisant une connexion Wifi et une connexion 4G. Notre objectif majeur est d'assurer que les voitures intelligentes sont capables de maintenir en temps réelles la communication en utilisant les deux méthodes de connections. Pour assurer une bonne qualité des données transmises, notre configuration va inclure la disponibilité du réseau, la force du signal et la sécurité du réseau. Et pour valider notre travail, nous avons eu recours à plusieurs expérimentations en utilisant des voitures automatisées. Ce travail est le fruit de mon stage de recherche à l'Université Carlos 3 de Madrid en Espagne spécialement au laboratoire Intelligent System Lab. Les résultats obtenus prouvent la performance de l'approche proposée dans le but d'optimiser la stabilité des données partagées.

5.2 Les systèmes de Transport Intelligent

5.2.1 Définition

La mobilité croissante des personnes nécessite une attention particulière de la part des chercheurs, puisque près de 3500 personnes meurent chaque jour sur les routes et qu'à peu près 10 millions de personnes sont blessées à la suite d'un accident de la route. Les piétons, les enfants, les cycliste et les personnes âgées sont parmi les utilisateurs de la route les plus vulnérables, selon l'organisation mondial de la santé (WHO) [Organization, 2018]. Les erreurs humaines telles que la consommation d'alcool, la mauvaise visibilité dans le trafic, l'absence des ceintures de sécurité, et l'utilisation des téléphones portables sont considérées comme un facteur de risque majeur qui influence sur le taux des accidents. De nombreux efforts ont été déployés pour résoudre ces problèmes en orientant les recherches sur les systèmes de transport intelligents (STI) pour sauver des vies.

Les systèmes de transport intelligents sont les applications des nouvelles technologies de la communication et de l'information dans le domaine des transports et de sa logistique. Ils sont nommés intelligents car leur développement repose généralement sur des fonctions associées à l'intelligence tel que la communication, la mémoire, le comportement adaptatif, les capacités sensorielles et le traitement de l'information. On trouve les systèmes de transport intelligent dans plusieurs champs d'activité comme l'amélioration de la sécurité coté "sécurité routière", surtout, le développement des services et aussi l'optimisation de l'utilisation des infrastructures. Les progrès technologiques dans le domaine des systèmes de transport intelligents augmentent rapidement en raison de leur importance cruciale pour sauver des millions de vies sur les routes. Ces systèmes visent à atteindre l'efficacité du trafic en minimisant ces problèmes. Ils visent à réduire par exemple le temps que les personnes passent en route tout en améliorant leur sécurité ainsi que leur confort et cela grâce aux progrès des capteurs qui ont permis de développer ces systèmes de transport intelligent sur la base des données fréquentes, fiables et de grande quantité. Actuellement on arrive à obtenir des mesures précises sur les véhicules tel que la longueur, son poids ou sa silhouette, on arrive à extraire des informations sur la circulation tel que le débit, le

taux d'occupation ou la vitesse ; on peut aussi avoir des informations sur des événements tel que l'incidents, les files d'attentes et cela grâce aux capteurs qui sont installés, intégrés, se trouvant à proximité ou des capteurs disposés dans les véhicules.

Grâce à l'évolution technologique de ces dernières années, les RCSF sont grandement développés. Ils sont bien adaptés à être utilisé dans les systèmes de transport intelligent grâce à leur petits capteurs et technologie sans fil ainsi que leur réactivité et leur logique de conception naturellement distribuée. Ces RCSF possèdent l'avantage d'être facilement intégrables aux niveaux des infrastructures routières et au niveau des voitures, sans oublier leur faible cout en les comparants avec d'autres technologies.

De nombreuses technologies de communication sans fil sont proposées pour ces systèmes de transport intelligent, on y trouve des communications sans fil a courte portée comme le WiFi et des communications sans fil ayant une plus longue portée comme le WiMax, la technologie 3G ou 4G.

L'élément clé des systèmes de transport intelligent est la mise en place d'une infrastructure de réseau adéquate pour prendre en charge les véhicules intelligents. Afin de gérer les voitures connectées et automatisées en anglais Connected and Automated Vehicles (CAV), une connexion adéquate entre tous les utilisateurs de la route est nécessaire, les conducteurs et la coordination du trafic sont considérés deux éléments essentiels. Plusieurs instituts de recherche travaillent sur le point de l'amélioration de la communication des véhicules intelligent [Kargl et al., 2008].

5.2.2 Véhicule autonome connecté

Un véhicule autonome est un véhicule automobile capable de rouler sans l'intervention du conducteur sur une route. Son concept principal vise à développer et produire un véhicule capable de circuler sur les voies publiques dans les trafics sans intervention humaine et en tout type de situations. C'est une application liée au domaine de la robotique mobile dans laquelle différents acteurs sont engagés. La voiture autonome peut recouvrir un véhicule totalement autonome ou bien semi autonome disposant de différents systèmes d'aide à la conduite automatisée.

Les véhicules autonomes, sont des véhicules standards dotés et équipés de capteurs numériques comme les camera, les radars, les lidars, *etc.* Leurs données sont traitées par des processeurs et logicielles spécifiques en utilisant différentes techniques et en prenant en considérations différentes contraintes. En utilisant la fusion des données, ces logiciels reconstituent une situation et emploient des algorithmes d'intelligence artificielle pour prendre des décisions sur les actions à réaliser. Comme nous avons déjà cité, en termes d'accidentologie, les statistiques révèlent que la plupart des accidents de la route sont liée à des erreurs humaines, donc la généralisation des voitures autonomes pourrait aider par exemple à :

- Réduire les accidents et les embouteillages grâce au système de communication entre véhicules ;

- ☐ Réduire l'espace nécessaire au parking des véhicules par le partage des véhicules autonomes ;
- ☐ Avoir une bonne efficacité énergétique ce qui aidera à diminuer la pollution ;
- ☐ Réduire le nombre de la main d'oeuvre nécessaire au secteur du transport.

Mais certains défis demeurent à surmonter comme :

- ☐ Le surcout d'un véhicule autonome par rapport à son équivalent non autonome, qui pourrait décourager les clients.
- ☐ Le piratage informatique des voitures.
- ☐ La possibilité de surveiller et contrôler les déplacements des utilisateurs par les constructeurs automobiles.

Selon la National Highway Traffic Safety Administration, une agence fédérale chargée de la sécurité routière aux Etats Unis, les voitures autonomes peuvent être classifiées en 5 niveaux :

- **Niveau 0 : Aucune automatisation** : le conducteur à un contrôle total et à tout moment aux fonctions principales du véhicule.
- **Niveau 1 : Assistance au conducteur** : l'automatisation est présente pour certaines fonctions du véhicule, mais ne font qu'assister le conducteur qui garde le contrôle global.
- **Niveau 2 : Automatisation de fonctions combinées** : permet de contrôler au moins deux fonctions principales qui seront combinées dans l'automatisation pour remplacer le conducteur dans certaines situations.
- **Niveau 3 : Conduite autonome limitée** : la conduite autonome ne peut avoir lieu que dans certaines conditions environnementales, le conducteur peut donc céder le contrôle complet du véhicule au système automatisé qui sera chargé des fonctions critiques de sécurité et il est imposé au conducteur d'être en mesure de reprendre le contrôle de la voiture dans un temps acceptable sur demande du système.
- **Niveau 4 : conduite autonome sous conditions** : les véhicules sont conçus pour assurer tout seul toutes les fonctions critiques de la sécurité sur un trajet complet. Le conducteur peut fournir la destination ou des consignes de navigation mais il n'est pas tenu de se rendre disponible pour reprendre le contrôle. Le véhicule peut circuler sans occupant à bord.
- **Niveau 5 : Conduite complètement autonome** sans l'aide du conducteur dans toutes les circonstances.

De nos jours, les chercheurs s'occupent d'améliorer la communication des véhicules intelligent, en mettant en place des infrastructures réseau capable de maintenir les véhicules intelligent. Il existe de nombreuses technologies de communication véhiculaire, constituées de différentes entités telle que les véhicules eux mêmes, les piétons et les infrastructures. Ces éléments ont besoin d'un moyen de communication pour communiquer et partager les informations. On pourrait donc distinguer la communication de

véhicules à véhicules [Raw and Das, 2011], la communication d'un véhicule à un piéton [Merdrignac et al., 2015] et la communication véhicule et infrastructure [Santa et al., 2008]. Ces types de communication seront expliqués en détails dans la section suivante.

5.2.3 Système de communication

Selon la définition de la société des systèmes de transport intelligent, donnée aux entités routières, ils sont classés en véhicules, piétons et infrastructures, et pour avoir une coopération entre les entités, plusieurs schémas de communications sont nécessaires. Donc le système de communication véhiculaire appelé Vehicle to everything (V2X), est composé de : Vehicle to Vehicle (V2V), Vehicle to Infrastructure (V2I) et Vehicle to Pedestrian (V2P) [Papadimitratos et al., 2009]. La Figure 5.1 illustre l'ensemble des types des systèmes de communications. Le schéma de communication vehicle to vehicle est défini comme étant la transmission des données entre plusieurs véhicules, qui a comme objectif principal d'améliorer les capacités de perception et réduire le nombre d'accidents sur les routes [Fahmy et al., 2017]. Pour la deuxième catégorie vehicle to Infrastructure, elle peut apporter des améliorations aux véhicules automatisés par exemple, la suggestion de vitesse à poursuivre ou bien d'itinéraires, en se basant sur les informations instantanées des feux de circulations et son utilisation permet la coordination du trafic, la surveillance et la gestion de la pollution à des fins de contrôle dans les villes intelligentes [Msadaa et al., 2010], [Cho et al., 2009]. Concernant la communication véhicule aux piétons [Liu et al., 2010], elle englobe une large communauté des utilisateurs de la route, et qui permet une détection bilatérale (détection au niveau des deux côtés le véhicule et le piéton) ainsi que des notifications systèmes. Les trois catégories de communication sont expliquées en détails dans ce qui suit :

5.2.3.1 Vehicle to Vehicle Communication

Afin de partager les informations entre les véhicules, le V2V est l'approche utilisée le plus. La communication entre véhicules consiste à partager les informations les plus pertinentes entre tous les véhicules sur la route comme la position, le statut et les obstacles tout en maintenant une connexion continue entre les véhicules du système pour garantir une bonne qualité d'information échangée. Dans la littérature, plusieurs schémas sont en cours de recherche pour les véhicules afin d'envoyer les messages en sécurité aux autres véhicules avec une fiabilité élevée et des délais réduits [Xu et al., 2004]. Les chercheurs ont développé une communication entre véhicules en utilisant les rayons infrarouges [Fujii et al., 1996]. Puis la technologie Ultra Wide Bandwidth (UWB) a été adoptée pour la construction des systèmes de communication entre les véhicules [Kim and Choi, 2003]. D'autre solutions ont été proposées, comme des solutions qui utilisent les réseaux ad-hoc, créés par la connexion temporaire des véhicules. Pour les réseaux véhiculaires ad-hoc, les données sont transmises d'une voiture à une autre seulement quand elles sont dans la zone de transmission l'une de l'autre [Hartenstein and Laberteaux, 2010]. De plus, les recherches

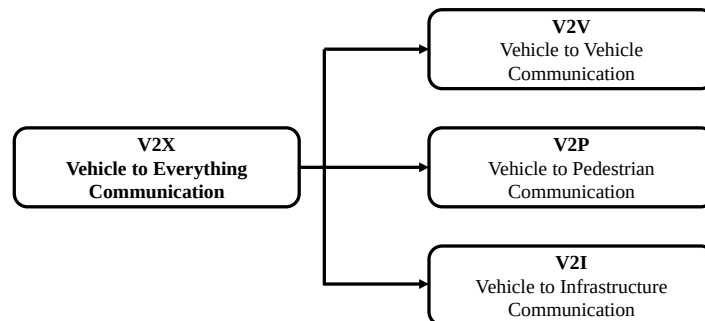


FIGURE 5.1 – Type des systèmes de communication

se sont orientées vers l'utilisation du standard IEEE 802.11p qui est une amélioration approuvée du standard IEEE 802.11 pour ajouter un accès sans fils dans l'environnement des véhicules (WAVE), un système de communication véhiculaire. Il définit les améliorations requises à la norme 802.11 pour prendre en charge les systèmes de transport intelligent. Et avec le développement des technologies de communications sans fils, les réseaux cellulaire 5G, 4G ou 3G ont été utilisés dans les communications pour fournir une large bande passante pour la transmission de données [Association et al., 2016], [Kokuti et al., 2017].

5.2.3.2 Vehicle to Pedestrian Communication

Les approches en matière de la sécurité des piétons dans le domaine des systèmes de transport intelligent se base sur la communication avec les piétons qui est une fonction cruciale. La protection des piétons est donc très importante pour la protection des utilisateurs de la route vulnérables grâce à une communication avec les véhicules. Le principal inconvénient de ces approches est la dépendance vis-à-vis de la détection des piétons. Par conséquent, l'utilisation des communications V2P et P2V améliore la sécurité routière [Liu et al., 2010]. La communication V2P est effectuée grâce à un échange des informations en utilisant un smartphone, ces messages de communication partagés peuvent inclure par exemple, la vitesse, la position et l'orientation. Pour assister les utilisateurs de route vulnérables (VRU), les chercheurs se sont concentrés sur l'utilisation des technologies de communication. Les auteurs dans [Anaya et al., 2014], créent l'exigence d'un échange d'informations minimale pour donner aux utilisateurs de la route suffisamment de temps pour percevoir la situation et réagir. Ils introduisent également une application de protection de piétons permettant de calculer les risques et de signaler les dangers. De plus, les au-

teurs dans [García et al., 2013] présentent une approche basée sur la fusion des données, car la fusion des données permet de surmonter les limites de chaque système et fournit également un suivi précis et fiable de tout mouvement de piéton.

5.2.3.3 *Vehicle to Infrastructure Communication*

La troisième approche est la communication entre les véhicules et les infrastructures. De nos jours, la communication V2I offre plusieurs avantages pour les véhicules automatisés, tels que les détails du cycle des feux de circulation, les alertes potentielles aux dangers de la route, et d'autres informations contextuelles. De plus cette communication est essentielle pour la gestion des villes intelligentes. Donc on peut déduire que la communication entre les véhicules et les infrastructures est essentiel car elle régit l'échange d'information critique de sécurité ainsi que les données opérationnelles entre les véhicules et l'infrastructure. Cette communication peut inclure des panneaux de signalisation électroniques, des alertes de traversement des rails (railroad crossing warning), assistance de fusion d'autoroute, des avertissements de collision à des intersections *etc.* On peut se connecter à l'infrastructure routière via WIFI ou Wi-FiMax [Chou et al., 2009] ce qui permet aux véhicules de communiquer avec certaines infrastructures routières pour partager par exemple, l'emplacement et la vitesse du véhicule, qui seront transmis à un serveur central, le serveur gèrera et regroupera les données afin de déterminer par exemple l'emplacement d'un incident ou le chemin le plus rapide entre l'emplacement actuel du véhicule et sa destination. Et comme la communication V2V est étroitement liée à la communication V2I, certains chercheurs tentent d'utiliser une architecture qui combine les deux pour avoir une architecture V2V2I, telle qu'elle est présentée dans [Miller, 2008] qui est une technologie hybride qui tire parti des requêtes rapides et de la réponse de l'architecture V2I.

Les travaux actuels tentent d'améliorer la communication véhiculaire des systèmes de transport intelligent, en mettant le point sur la pertinence des informations transmises qui garantissent une bonne prise de décision. Dans ce chapitre notre objectif principal est d'avoir une bonne qualité d'informations partagées entre les différentes entités du système ainsi que de minimiser la consommation énergétique au niveau de notre système. Ces entités nécessitent une liaison sans fil pour communiquer et partager leurs informations; différentes technologies de communication sans fils sont disponibles de nos jours, elles dépendent seulement de l'emplacement et la zone, on y trouve le Wifi pour les communications sans fil à courte portée ou les technologies 3G ou 4G pour une plus longue portée de communication sans fil. Nous allons essayer d'introduire une nouvelle approche hybride pour la communication V2X en utilisant les connexions Wifi et 4G qui vont être utilisé comme moyen de communication entre les entités du système.

5.3 Approche de Communication proposée

Notre étude, au niveau de ce chapitre, porte sur les aspects de la communication sans fils pour les systèmes de transport intelligent. Notre approche vise à garantir la qualité des informations pour avoir une bonne réception des messages ainsi que de minimiser la consommation énergétique pour maximiser la durée de vie de notre système. L'approche de communication proposée est décrite au niveau de cette section, implémentée sous Ubuntu, en se basant sur Robot operating system (ROS) architecture, qui est expliquée en détails au niveau du matériel et logiciel utilisés pour la réalisation de ce travail. L'idée principale de notre approche repose sur l'utilisation des classes de QtNetwork [Qt, 5 30] pour dialoguer avec NetworkManager en utilisant le protocole DBus supporté par QtNetwork et NetworkManager. C'est le service par défaut, sur Ubuntu, qui permet d'interroger les connexions réseau et avoir toutes les informations sur les liaisons existantes et aussi être en mesure de se connecter ou se déconnecter. Sous linux, les connexions réseaux sont gérées directement à partir de QtNetwork, la gestion des services réseaux est exposée *via* le protocole DBus. Nous avons utilisé la documentation, DBus API documentation [Love, 2005] pour manipuler les classes de QtDBus afin d'obtenir les informations nécessaires. La documentation API est une interface de programmation applicative qui contient un ensemble normalisé de classes, de fonctions ou méthodes qui sert de façade par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels. Elle est offerte par un service web ou une bibliothèque logicielle, la plupart du temps accompagnée d'une description qui explique aux utilisateurs comment ils peuvent se servir des différentes fonctionnalités d'un programme.

Dans notre travail, nous avons pu concevoir deux approches : une approche globale et une autre spécifique. Les deux approches sont décrites en détails au niveau des sous sections suivantes :

5.3.1 Approche Globale

Internet est un réseau informatique mondial accessible au public. Il est composé de millions de réseaux aussi bien publics que privés, universitaires, commerciaux et gouvernementaux, qui sont eux même regroupés en réseaux autonomes. Les données sont transmises par internet grâce à un ensemble de protocoles qui s'occupent de transférer les données à leur destination finale. L'ensemble d'informations est échangé grâce à un accès internet, cet accès peut être obtenu à l'aide d'un fournisseur d'accès à travers différents moyens de communication électronique, soit filaire par réseau téléphonique commuté, ADSL, ou fibre optique, soit sans fils comme le WiMAX, la 3G, la 4G ou la 5G. Cette évolution d'internet a permis d'avoir un large choix et une grande disponibilité indépendamment de l'endroit où on se trouve.

Concernant la réalisation de notre approche, nous avons opté pour l'utilisation du Wifi et de la 4G, vu que maintenant où qu'on soit on peut capter un réseau wifi. Il devient très tendance vu son efficacité, sa stabilité, sa souplesse, son évolutivité et où qu'on soit

on arrive à se connecter par un réseau Wifi et en profiter. Le problème du Wifi c'est que si on est trop loin de celui-ci on arrive plus à se connecter, nous devons avoir au plus une distance de soixante mètres par rapport au Wifi. Un autre problème de cette technologie est lié au nombre d'utilisateur, si le Wifi a trop d'utilisateurs, la connexion devient très lente.

L'idée principale de notre approche pour garder la voiture intelligente connectée indépendamment de son emplacement, et vu que le réseau Wifi du campus universitaire n'est pas toujours fiable et disponible, on a recours de temps à autre à une connexion 4G. La connexion 4G est stable mais elle a un coût énergétique élevé. Donc nous avons conçu une approche de communication hybride pour avoir une continuité du signal et une bonne qualité. Notre approche commute entre une connexion Wifi et une connexion 4G, tout en répondant aux différentes contraintes liées à la qualité des données transmises ainsi qu'au coût énergétique.

Concernant notre première approche, son objectif principal est de se connecter en premier à une bonne connexion Wifi avec un signal élevé. Donc pour être connecté, le système vérifie tous les réseaux actifs disponibles, les répertories avec leur nom et force du signal puis les stocks dans un ordre croissant en fonction de leur force du signal. Ensuite le meilleur réseau Wifi est choisi en prenant en considération le seuil du signal. Si le signal du réseau est supérieur au seuil, le système va être connecté, mais si ce signal est inférieur au seuil pour tous les Wifi actif, alors le système demande l'accès au réseau cellulaire 4G. La Figure 5.2 schématise les principales fonctions de notre approche globale et l'algorithme 5.1 explique en détails cette approche.

Algorithme 5.1 Algorithme Approche Globale

Vérification pour les réseaux Wifi actif

Si Il y'a un réseau qui existe **Alors**

On vérifie sa force du signal

Sinon

On demande accès au réseau cellulaire 4G

Finsi

Si La force du signal est supérieur au seuil **Alors**

Stocker les noms des réseaux actifs ainsi que leur force du signal dans un ordre croissant et se connecter au meilleur réseaux

Sinon

Se connecter au réseau cellulaire 4G

Finsi

Parmi les avantages de l'approche globale, nous pouvons avoir un large choix de connexion Wifi avec un très bon signal et assez puissant. Le problème qui se pose est le problème de sécurité, lorsqu'on utilise des réseaux qui ne sont pas sécurisés il y'a toujours un risque de fuite d'information, de présence de personne inconnue avec qui on partage le

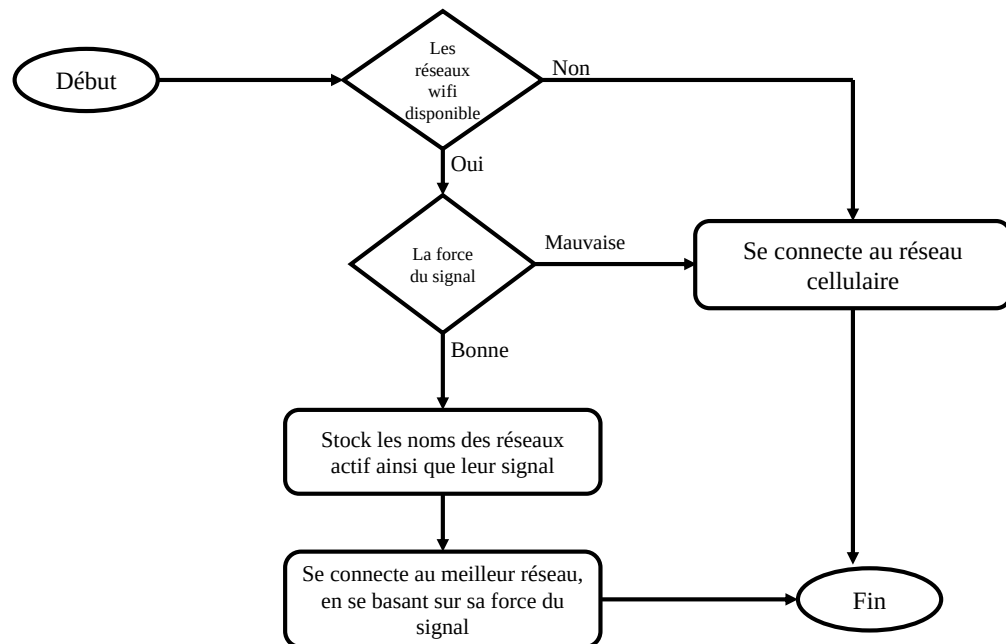


FIGURE 5.2 – Schéma de l'Approche Globale

même réseau, de piratage *etc.*,. Sachant que les systèmes véhiculaires doivent fonctionner de manière autonome sans aucune intervention donc la sécurité est un point très important. Pour résoudre ce problème et avoir plus de sécurité nous avons proposé notre deuxième approche qui est l'approche spécifique.

5.3.2 Approche Spécifique

La sécurité et la protection des informations privées sont l'un des problèmes des véhicules intelligents. Pour montrer la faisabilité de notre approche de communication hybride qui répond aux exigences et essaye de résoudre quelques problèmes des voitures intelligentes, une approche spécifique a été mise en place. Cette approche est un cas particulier de l'approche globale expliquée précédemment.

Le concept de cette approche spécifique est de rendre notre système plus sécurisé en le connectant à un réseau local spécifique *via* une connexion Wifi sécurisée avec authentification, et cette approche peut également commuter entre le Wifi et la 4G en fonction de la qualité du signal du Wifi. Pour cela, un seuil fixe est défini afin de se connecter au Wifi uniquement lorsque le signal est suffisamment puissant pour assurer une connexion stable et de bonne qualité. Si le signal Wifi est inférieur à ce seuil, le système se connectera au réseau 4G. De plus afin d'accroître et mieux sécuriser la connexion, la

communication V2X est établie *via* un réseau privé Virtuel (VPN) afin de chiffrer les données partagées dans le système, ce qui protège les communications même si le réseau Wifi est partagé.

Le problème rencontré au niveau de l'application de notre approche, concerne le VPN, et spécialement lors de la commutation entre le Wifi et la 4G. Le VPN doit à chaque fois être stoppé et redémarré à nouveau pour une bonne exécution. Puisque l'iCab est une voiture intelligente, donc toutes les opérations doivent être effectuées de manière autonome sans aucune intervention humaine. Pour cela, nous avons décidé de développer et insérer dans notre code un arrêt et un redémarrage du VPN qui sera exécuté automatiquement à chaque fois que le système commute entre le Wifi et la 4G. Cela fait partie également de l'un des problèmes traités durant mon stage.

5.4 Travail Expérimental

Dans cette section nous allons définir notre travail expérimental, pour cela nous allons présenter les plateformes utilisées ainsi que les conditions d'environnements. Nous allons également décrire les scénarios choisis pour effectuer les tests de notre approche hybride de communication V2X proposée. Et finalement nous allons définir les métriques utilisées pour évaluer les performances de notre approche.

5.4.1 Description du Matériel

La plateforme autonome utilisée dans toutes nos expériences est constituée des véhicules du projet Icab. Ces voitures sont équipées de plusieurs modules de navigation et de perception de l'environnement, elles sont modifiées électroniquement et mécaniquement pour avoir un mouvement automatisé. Elles sont dotées d'un ensemble d'appareils et capteurs qu'on expliquera en détails au niveau des prochaines sous-sections.

5.4.1.1 iCab

Le projet iCab comprend deux voitures de golf électrique, comme illustré sur la Figure 5.3. ICab est une abréviation de "Intelligent Campus Automobile" et qui fait partie des Unmanned Ground Vehicle (UGV), ce sont des véhicules sans pilotes, qui peuvent fonctionner sans présence humaine à bord. Les véhicules sont modifiés électriquement, électroniquement et mécaniquement afin de permettre une conduite autonome qui permet de répondre aux demandes des utilisateurs du transport avec un minimum d'intervention humaine.

5.4.1.2 Appareils embarqués

Les deux plates formes sont presque identiques en termes d'appareils embarqués. La Figure 5.4 montre l'icab 1 en indiquant l'emplacement de tous les périphériques intégrés. La description de tous les dispositifs est résumée dans le Tableau 5.1.



FIGURE 5.3 – Matériels utilisé : iCab 2 rouge est une EZ-GO RXV (2008) et iCab-1 bleue EZ- GO RXV (2009)



FIGURE 5.4 – iCab 1 vue de face et de côté pour les appareils embarqués à bord

TABLE 5.1 – Description des modules embarqués sur les iCabs

Catégorie	Matériels	Description	
		iCab-1	iCab-2
Ordinateurs	Ordinateur embarqué 1	AAEON AEC-6877 ¹	
	Ordinateur embarqué 2	Intel NUC6i7KYK ²	
Capteurs	Laser rangefinder	Utilise un rayon laser pour déterminer la distance à un objet. SICK LMS291 ³	
	Stereo camera (camera stéréoscopique)	Bumblebee 2 1394a ⁴	Bumblebee XB3 1394b ⁵
	Lidar	Velodyne VLP-16 Puck ⁶	
	GPS avec compas	3DR UBlox Module ⁷	
	Kinect	Capteur kinect ⁸ : permettant de contrôler une interface sans utiliser de manette.	
	Capteurs ultrasonique	MaxBotix MB 8450 ⁹ : mesurent les distances en fonction de l'émission et de la réception de signaux ultrasonores	
Auxiliaire	Ecran tactile principal	Hannspree HT 231 HPB 23" Touchscreen ¹⁰	
	Ecran tactile secondaire	Xenarc 705TSV 7" Touchscreen ¹¹	
	Routeur	TP-LINK Archer AC750 4G LTE ¹²	
	Lumière	Lumière d'avertissement tournante	
	Avertisseur sonore	Pour les avertissements	
	Haut-parleur	Haut-parleur stéréo	

Chaque iCab est utilisé pour que l'architecture logicielle permette de concevoir des voitures automatisées. Les ordinateurs utilisés fonctionnent sous Ubuntu 16.04 LTS comme système d'exploitation et exécutent le Système ROS abréviation de Robot operating system, 5.4.2.1. Les capteurs sont utilisés pour avoir les informations nécessaires concernant la localisation, la cartographie et la perception de l'environnement ; en outre les données sont fusionnées pour une meilleure performance globale du système. En ce qui concerne les auxiliaires, ils sont utilisés comme plateforme pour le passager en étant des dispositifs d'information et d'avertissement. Toutes les installations, le montage, le câblage des appareils ont été effectués à l'université Carlos 3 de Madrid par les étudiants du laboratoire intelligent system lab. La Figure 5.5 est une capture de l'interface graphique de l'utilisateur de l'iCab.

5.4.2 Description du Logiciel

Pour être bref la Figure 5.6 schématise l'architecture globale des iCab. Elle se compose de cinq principales couches qui sont implémentées en utilisant ROS ; les couches acquisition, traitement, décision, contrôle et activation. Chaque couche est composée de plusieurs classes ou paquets qui permettent d'envoyer et recevoir les informations ainsi que de connecter l'ensemble de l'architecture à une seule entité.

La première couche est la couche d'acquisition, où les progiciels des pilotes (drivers) fournissent une interface logicielle aux capteurs intégrés, permettant au système d'exploitation d'accéder aux fonctions du périphérique et de publier les données au format correspondant à celui des messages ROS. La deuxième couche, est la couche traitement, qui contient les systèmes centraux pour l'automatisation des véhicules et où plusieurs systèmes de localisation sont mis en oeuvre pour estimer la position et l'orientation du véhicule dans l'environnement, ainsi que des systèmes de cartographie permettant de comprendre l'environnement au niveau global et local. On a aussi les systèmes de perception qui sont implémentés au niveau de cette deuxième couche pour la détection et la classification des obstacles. Plusieurs schémas de communication sont mis en oeuvre et qui sont utilisés dans les systèmes de coopération et coordination. Lors de la finalisation du

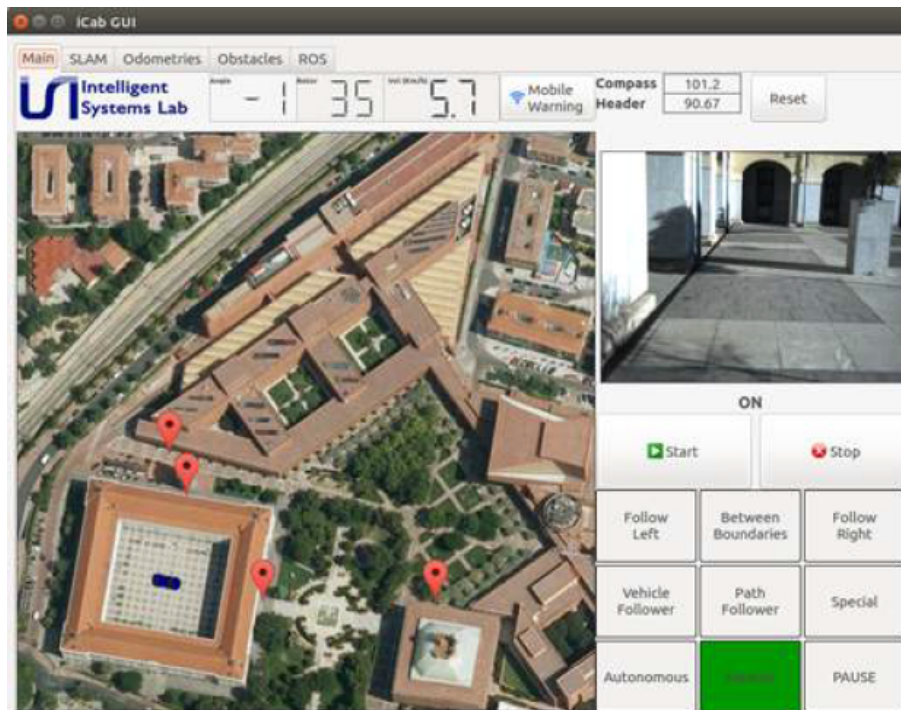


FIGURE 5.5 – Interface graphique de l'utilisateur de L'iCab (GUI)

traitement de toutes les données des capteurs, les décisions sont prises au niveau de la troisième couche qui est la couche décision où les systèmes de planification sont mis en oeuvre. Ensuite la couche de contrôle planifie la sortie et estime les actions nécessaires pour le déplacement du véhicule. Et enfin la sortie de la couche contrôle est connectée à la couche action qui comporte les systèmes de conduite du véhicule, comme le freinage, la conduite et la direction.

5.4.2.1 ROS Framework

ROS signifie robot operating system, qui est une Framework de programmation open source pour la robotique, dont le développement a commencé à la fin des années 2000 à l'université de Stanford and willow Garage [Quigley et al., 2009]. Pour mieux comprendre les avantages de ROS, voyons voire comment été menés les projets de robotique développés avant son existence. Les types des systèmes disponibles dans le commerce sont toujours des systèmes de control de logiciel impliqués et hautement spécialisés pour les tâches prévues, chaque système étant différent, il manque donc une standardisation et par conséquent un long temps de développement. ROS a changé cette situation en créant un Framework permettant de développer des logiciels, il facilite et encourage le partage et la réutilisation des bonnes idées. L'objectif n'est pas d'avoir un logiciel à usage général qui résoudra tous les problèmes liés au développement de la robotique mais ROS essaye de maximiser l'utilité d'avoir des Framework de programmation open source qui permettent de résoudre

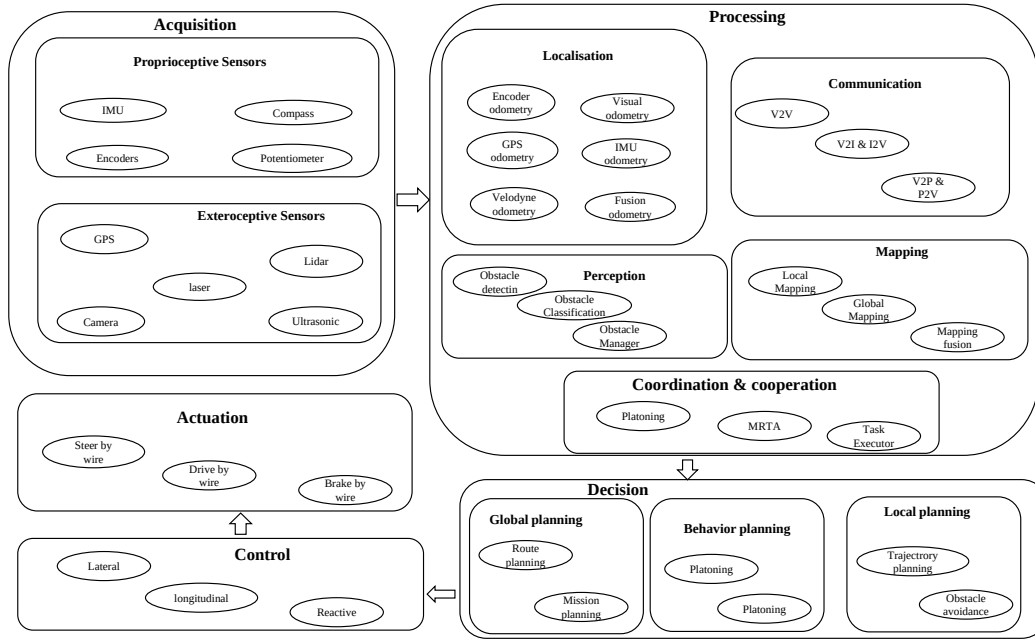


FIGURE 5.6 – Architecture logicielle globale de l'iCab

de nombreux problèmes courants rencontrés par les développeurs de la robotique.

ROS permet le développement en fournissant gratuitement une bibliothèque de code réutilisable disponible. Il permet également un environnement d'exécution qui prend en charge la communication en temps réel entre les différents éléments du système et les données partagées. De plus ROS, fournit des normes de programmation qui sont utiles pour créer et utiliser des codes pris en charge par ROS de manière fiable et reproductible. Il existe également une série d'outils de développement de ROS qui sont utiles pour surveiller, dépanner et visualiser le système. A mentionner que ROS compte une communauté dynamique d'une dizaine de milliers d'utilisateurs et de contributeurs partout dans le monde. La Figure 5.7 présente les principaux modules de ROS.

5.4.2.2 Qt

Comme nous l'avons déjà mentionné au niveau de la description de notre approche hybride de communication proposée, nous avons eu recours à l'utilisation de Qt. Celle-ci est une API orientée objet et développée en C++ par The Qt company et Qt project. Qt essaye d'offrir des composants d'interface graphique, de gestion des fils d'exécution, d'accès aux données, d'analyse XML et de connexions réseaux qui est le point qui nous intéresse le plus au niveau de notre travail. Pour certains aspects, elle ressemble à un Framework lorsqu'on l'utilise pour la conception des interfaces graphiques. Qt permet la portabilité des applications qui n'utilisent que ses composants par une simple recompilation du code source. Elle est supportée par différents systèmes d'exploitation comme Unix (dont GNU/Linux), Windows, Mac OS X et aussi Tizen. Le fait qu'une biblio-

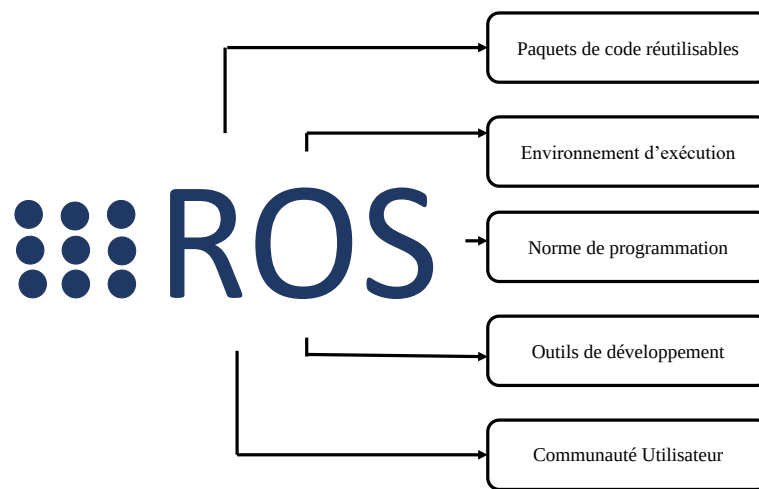


FIGURE 5.7 – ROS Framework modules

thèque logicielle multiplateforme attire un grand nombre de personnes, la chose qui leur permet de diffuser leurs programmes sur les principaux OS existants. Qt supporte également une dizaine de langages autre que le C++, comme Java, python, Visual Basic, Ruby etc. Il existe différentes versions de Qt allant de Qt1 à Qt5, chaque nouvelle version apporte un meilleur support que la précédente ainsi qu'une amélioration. Les dernières versions apportent une séparation entre données et présentation et divise la bibliothèque en modules. Parmi les modules que nous avons utilisé lors de notre implémentation on y trouve par exemple QtCore pour les fonctionnalités non graphiques utilisées par les autres modules, QtGui pour les composants graphiques, QtNetwork pour la programmation réseau. Et avec l'évolution des versions, d'autre modules sont conçus d'où QtDBus pour la communication inter-processus en utilisant le D-Bus qui est un logiciel de communication inter-processus permettant à des applications de communiquer entre elles. Il permet à des programmes clients de s'enregistrer auprès de lui pour offrir leurs services aux autres programmes, il leur permet en général de savoir quels services sont-ils disponibles.

5.4.3 Scénario

Pour mesurer les performances de notre approche hybride de communication et valider sa crédibilité et son efficacité, un scénario réel est mis en place pour tester et étudier les différents schémas de communication. En naviguant à l'intérieur du campus universitaire, plusieurs expériences ont été menées. De nombreux point d'accès Wifi étaient disponibles dans les bâtiments de l'université ayant des forces de signal différentes ainsi qu'un réseau mobile 4G était toujours disponible.

Lors des expériences effectuées, nous avons opté pour un schéma de communication

V2I, pour les tests de communication "véhicule to infrastructure", l'infrastructure est toujours statique et le véhicule est dynamique vu que les expérimentations seront au niveau du véhicule seulement. Le véhicule roule à une vitesse maximale de 8km/h. L'approche dynamique que nous avons choisie est connu d'avoir des résultats moins meilleurs que les résultats obtenus pour un état statique, en raison de l'itinérance entre les points d'accès et le changement de la force du signal. Un scénario avec un état statique du véhicule ne peut pas être envisagé pour tester notre approche hybride proposée car la qualité du signal du réseau n'aurait pas assez de changement pour permettre la commutation entre le Wifi et la 4G.

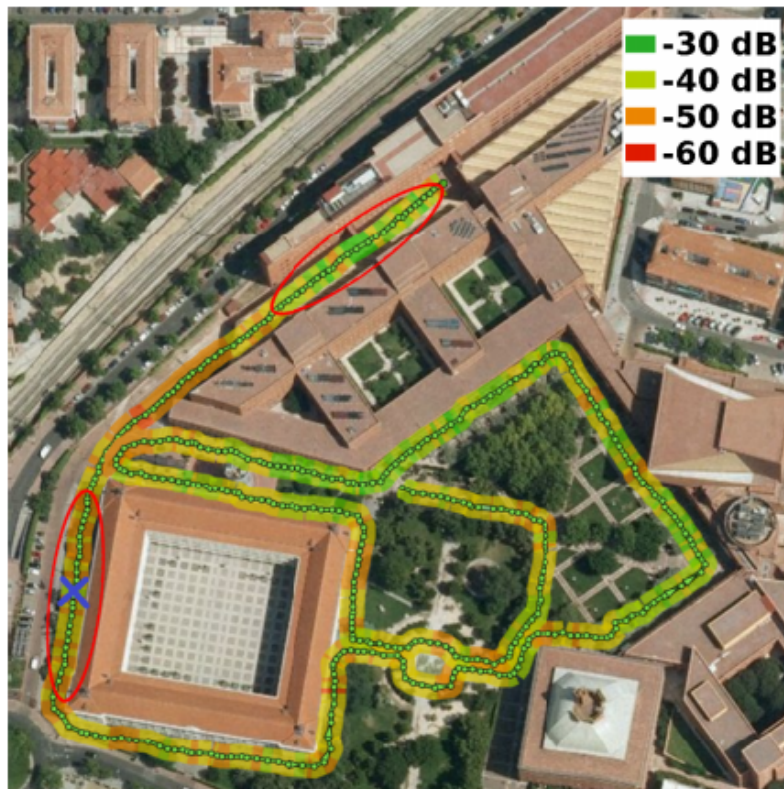


FIGURE 5.8 – La carte Map de notre environnement de test

La Figure 5.8 montre la carte map du wifi du campus universitaire, qui est cartographié en effectuant une expérience séparée à travers le campus entier. Le test 4G a également eu lieu lorsque le wifi n'est pas accessible, en utilisant un routeur 4G LTE de 150Mbps, le réseau 4G a environ 2Mbps de débit dans les deux sens de liaison : descendante et montante. La bande passante du réseau sans fil quant à elle est d'environ 4Mbps et 3.5 Mbps respectivement dans les cas des scénarios idéaux. La charge du canal (channel load) et la fréquence peuvent varier selon la force du signal.

5.4.4 Métrique d'évaluation

Afin de prouver les performances et l'efficacité de l'approche hybride de communication proposée pour les systèmes de transport intelligent, nous avons choisi pour décrire les caractéristiques du système le Round Trip Time (RTT) comme première métrique. Comme tous les schémas proposés utilisant la connexion par socket TCP, notre métrique est capable de donner des informations sur la qualité de ces connexions ainsi que les performances du réseau utilisé. Le RTT est défini comme le temps requis pour qu'un paquet soit envoyé d'une source spécifique à une destination spécifique et qu'il y retourne. Dans notre cas, le RTT peut être calculé en mesurant le temps qui s'écoule entre l'envoi d'un paquet de données et son accusé de réception sur l'interface réseau de l'expéditeur. Figure 5.9, mais le résultat dépend de plusieurs facteurs. Par exemple, le taux de transfert des données et la nature de transmission. La deuxième métrique adoptée est le gain énergétique ou l'efficacité énergétique qui désigne l'état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est minimisée. Parmi nos contraintes, nous avons choisi la consommation énergétique que nous essayons de réduire pour augmenter la durée de vie de notre système. Nous rappelons que nous avons opté pour une approche qui commute entre le Wifi et la 4G qui est considérée comme étant très gourmande en énergie.

Toutes nos mesures ont été effectuées coté véhicule et en analysant nos métriques, nous pouvons disposer de nombreuses informations telles que la disponibilité du réseau, la bande passante, la fluidité, la durée de vie de notre réseau.

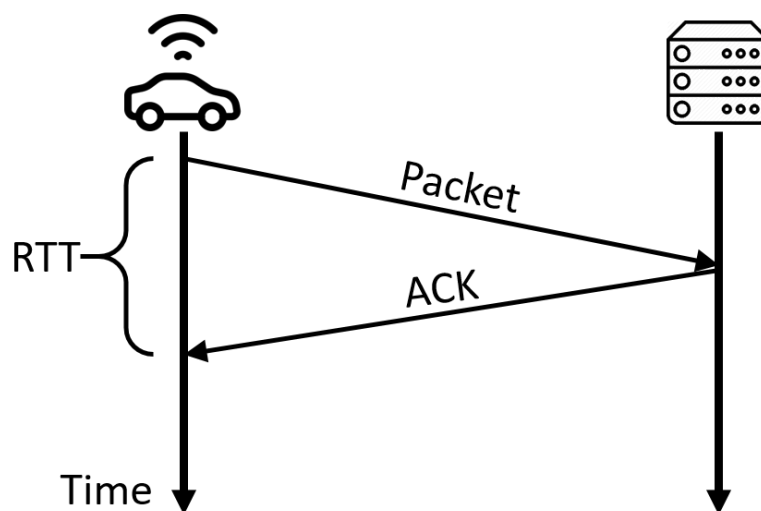


FIGURE 5.9 – Round Trip Time

5.5 Résultats et Discussion

Au niveau de cette section, nous allons présenter les résultats quantitatifs et qualitatifs obtenus à partir du scénario sélectionné. Ces résultats sont ensuite discutés et comparés aux travaux existants, afin de valider notre système proposé et de prouver son efficacité et ses avantages par rapport aux autres schémas de communication. Plus précisément, notre schéma de communication hybride proposé sera comparé à l'architecture présentée par les auteurs A. kokuti et al dans [Kokuti et al., 2017], dans laquelle l'utilisation des réseaux Wifi et 4G ont été comparés. Etant donné que les travaux sur mentionnés incluent la RTT des paquets TCP comme métrique de mesure de performance, cette métrique sera directement comparée et les résultats de l'approche hybride devraient comporter une combinaison de distribution temporelle du RTT entre le Wifi et la 4G. Pour présenter les données RTT obtenues, nous avons utilisé un outil de visualisations des graphiques du type box plots. Cela permet de représenter facilement la distribution des données prélevées, y compris la moyenne (average), le quartile (quartile), la médiane (median) qui est selon la théorie des probabilités et statistiques une valeur x qui permet de couper l'ensemble des valeurs en deux parties égales, les données aberrante (outliers). En appliquant notre approche hybride de communication avec un seuil de qualité de 63%, et pour une première expérimentation le véhicule est connecté au réseau 4G durant 61% du temps global et 39% du temps connecté au WiFi. Vu que notre expérience a été réalisée avec un seuil prédéfini, donc la connexion Wifi ne serait activée que si la force du signal Wifi est supérieure à ce seuil. La Figure 5.10 montre les valeurs du RTT en appliquant notre approche hybride avec l'utilisation de ce seuil. La moyenne de la valeur du RTT obtenue est de 31.6 ms, la médiane (la ligne orange à l'intérieure de la case) est de 2.95 ms et le IQR qui est interquartile range ou l'écart interquartile est de 39.7ms.

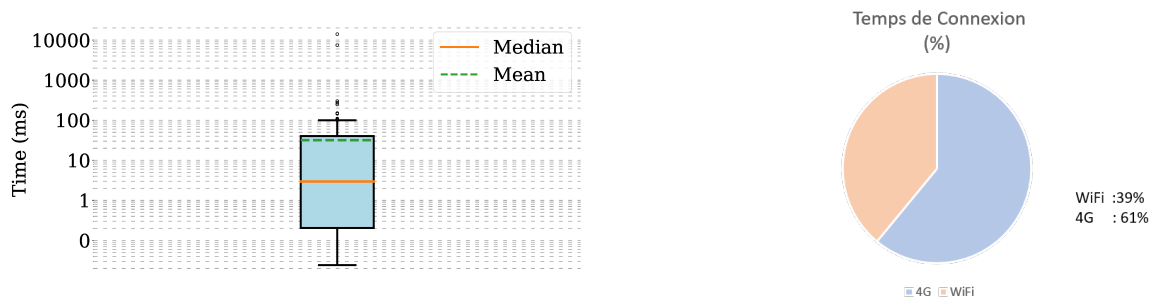


FIGURE 5.10 – RTT de l'approche Hybride avec Wifi 39% et 4G 61%

Comme présenté dans [Kokuti et al., 2017] et précisément la Figure 5.11 scénario 2, les valeurs du RTT pour une connexion 4G sont plus élevées que pour une connexion Wifi, tandis que les valeurs RTT du Wifi présentent une variance plus élevée et plus de valeurs aberrantes (outliers). Les résultats présentés à la Figure 5.10 combinent les deux valeurs

du RTT du WiFi et 4G, et montrent une variance plus élevée (une boîte plus large), une chose normale dû à la combinaison des deux différentes valeurs du RTT du WiFi et de la 4G créés par le mécanisme de la commutation.

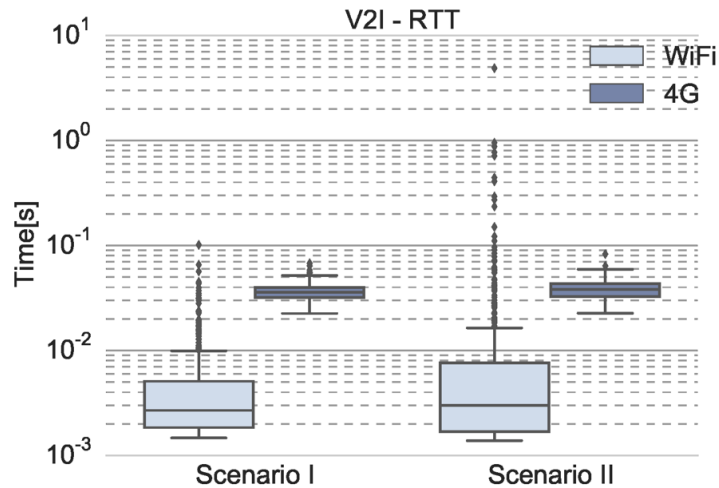


FIGURE 5.11 – Résultat de la communication V2I [Kokuti et al., 2017]

La Figure 5.12 présente les résultats d'un scénario similaire, en utilisant le même seuil 63%, mais avec une connexion 4G active 85% du temps de notre expérience et une connexion Wifi active 15% du temps global. Dans ce cas on obtient une moyenne du RTT d'une valeur de 31.6 ms, la médiane d'une valeur de 20.7 ms et un IQR d'une valeur égale à 44.7 ms. Etant donné que la moyenne du RTT est plus élevée pour la connexion 4G que le Wifi, il était supposé d'avoir une médiane plus élevée lorsque le pourcentage des paquets envoyés en utilisant une connexion 4G est plus élevé, comme il est visible au niveau du box plot.

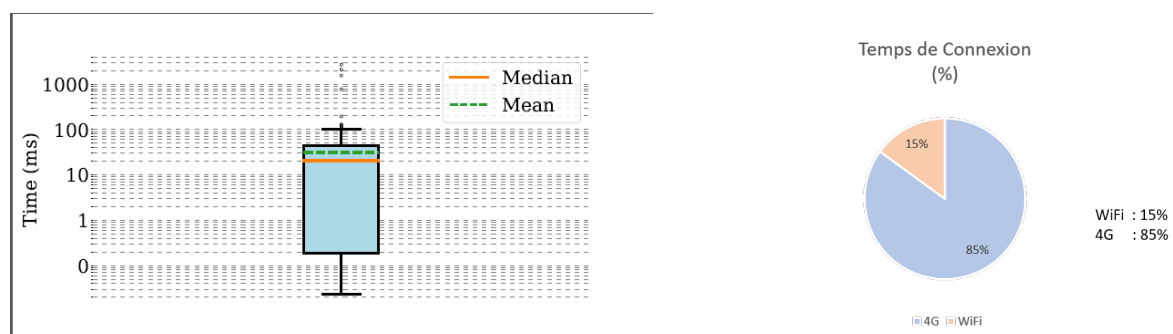


FIGURE 5.12 – RTT de l'approche Hybride avec Wifi 15% et 4G 85%

Les résultats obtenus montrent comment la commutation entre les deux différentes technologies réseau est réalisée et comment les valeurs du RTT des deux connexions sont

combinées. Comme présenté au niveau des Figure 5.10 et Figure 5.12, la distribution des données du RTT varie en fonction du pourcentage des paquets prévenant de l'interface Wifi ou de l'interface 4G. Dans le cas idéal, si le réseau Wifi est parfait, il devrait toujours être préféré. Toutefois, lorsque la force du signal des points d'accès Wifi n'est pas adéquate, la connexion 4G est une option plus appropriée en raison de sa stabilité et sa fluidité vu qu'on peut avoir un nombre élevé de déconnexion et de données aberrantes (outliers). Notre approche proposée et présentée exploite la connexion Wifi lorsque la qualité de son signal est suffisamment bonne et revient vers la 4G pour l'utiliser afin de garantir l'obtention d'une bonne qualité globale.

La Figure 5.13, schématise une partie du chemin couvert par l'iCab lors de nos expérimentations, en conduisant l'iCab à l'intérieure du campus universitaire et en appliquant notre approche, la couleur du chemin traversé change en fonction du réseau sélectionné selon la qualité du signal. Il varie entre bleue et rouge ce qui signifie la commutation entre une connexion Wifi et 4G. Lorsque l'iCab utilise une connexion Wifi son chemin est bleue puis rouge pour le second cas.

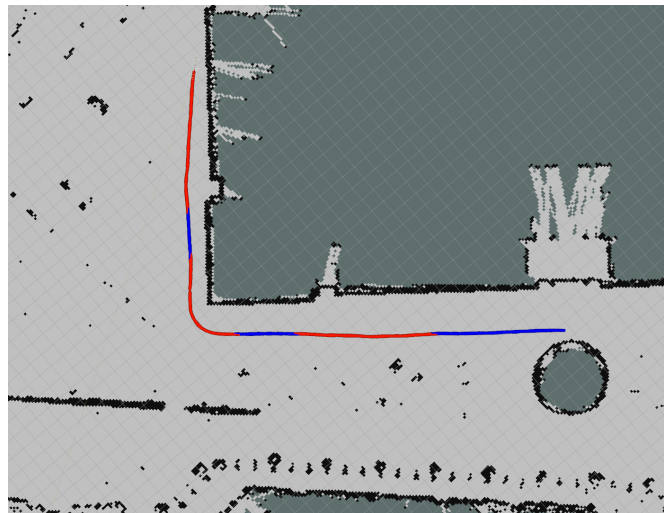


FIGURE 5.13 – Le chemin du véhicule en commutant les deux types de connexions réseau

La seconde métrique adoptée pour mesurer les performances de notre système est le gain énergétique. Nous avons tout d'abord réglé le problème du VPN causé par la commutation ; en effet, nous avons intégré au sein de notre code un arrêt et un redémarrage automatique lors de chaque commutation pour éviter toute intervention humaine lors de la conduite. Nous sommes capables de mesurer l'énergie consommée par notre système, pour cela nous avons deux cas, le premier cas c'est lorsqu'on utilise seulement une connexion 4G tout au long du trajet et le deuxième cas c'est lorsqu'on commute entre une connexion Wifi 39% du temps global et une connexion 4G 61% du temps ; avec le même temps d'expérimentation pour les deux cas, voire Tableau 5.2.

À noter que le calcul des résultats énergétiques est obtenu par les relations suivantes :

Paramètres	Cas 1 (No switching)	Cas 2 (Switching)	
		4G (61%)	Wifi (39%)
Temps d'expérimentation [s]	1205.00	735.05	469.95
Voltage [V]	36	36	36
Ordinateurs [A]	10	10	10
Capteurs [A]	7.5	7.5	7.5
Moteurs [A]	10	10	10
Routeur [A]	2	2	0
Energie [J]	1 279 710	780 623.1	465 250.5
		1 245 873.6	
Gain Energétique [J]	+ 33 836.4		

TABLE 5.2 – Calcul du gain énergétique pour une utilisation 4G 61% et Wifi 39% du temps global.

Le calcul de l'énergie est obtenu par la relation :

$$\text{Energie} = (\text{Temps de Fonctionnement}) \times (\text{Voltage}) \times (\text{Ampère}) \quad (5.1)$$

Puis le gain énergétique est obtenu par la différence entre les deux cas avec commutation et sans commutation :

$$\text{Gain Energétique} = (\text{Energie cas 1}) - (\text{Energie cas 2}) \quad (5.2)$$

Pour renforcer nos résultats, nous avons opté pour une deuxième expérience ayant le même seuil de qualité du signal mais avec un temps d'expérimentation différent que le premier ainsi qu'un pourcentage d'utilisation de chacune des connexions différentes. Nous avons utilisé cette fois une connexion 4G durant 85% et une connexion Wifi pour 15% du temps global.

Nous remarquons qu'au niveau du Tableau 5.3 même si nous avons utilisé la 4G pour une durée plus longue, nous avons pu avoir un gain énergétique. Donc le fait de commuter entre les deux connexions est bien meilleur que d'utiliser la 4G tout le temps. En commutant nous avons un gain énergétique et également une bonne qualité des données transmises vu que tout au long de notre trajet nous avons pu garder le transfert continu des données sans arrêt et cela grâce à la commutation entre le Wifi et la 4G.

Paramètres	Cas 1 (No switching)	Cas 2 (Switching)	
		4G (85%)	Wifi (15%)
Temps d'expérimentation [s]	1208.00	1026.80	181.20
Voltage [V]	36	36	36
Ordinateurs [A]	10	10	10
Capteurs [A]	7.5	7.5	7.5
Moteurs [A]	10	10	10
Routeur [A]	2	2	0
Energie [J]	1 282 896	1 090 461.6	179 388
		1 269 849.6	
Gain Energétique [J]	+ 13 046.4		

TABLE 5.3 – Calcul du gain énergétique pour une utilisation 4G 85% et Wifi 15% du temps global

5.6 Conclusion

Récemment les véhicules intelligents ont eu une attention particulière au sein de la société des systèmes de transport intelligent pour diminuer et réduire le nombre d'accident de la route causé par les erreurs humaines.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche hybride de communication V2X qui bascule entre l'utilisation des technologies Wifi et 4G. L'objectif de cette approche est de fournir un moyen efficace pour maintenir tous types de communications véhiculaire (V2V, V2I et V2P) sur la route en utilisant différentes façons de se connecter au réseau en fonction de la disponibilité et des configurations pré-réglées qui ont pour objectif de réduire la consommation énergétique de notre système et d'améliorer la qualité d'information en optant pour une connexion stable tout le temps peu importe l'endroit.

Nos approches proposées ont été validées en réalisant de véritables expériences en utilisant iCab qui est une voiture de golf électrique et autonome, plusieurs points d'accès Wifi sur le campus universitaire et une connexion 4G pour tester les communications V2I. Les résultats obtenus ont prouvé les performances et l'efficacité de notre approche hybride de communication qui sera très utile et aura un impact positif surtout coté énergétique.

Des travaux futur s'avèrent intéressante au niveau de ce domaine, comme la réalisation d'autres expériences à haute vitesse sur différentes routes, ainsi que de mesurer la puissance du signal 4G et inclure aux conditions de la commutation. De plus l'application de cette approche sur les drones sera très utile et aura un impact positif surtout côté optimisation énergétique.



CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La minimisation de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fils est considérée comme l'une des problématiques les plus complexes et a suscité un très grand intérêt de la part des scientifiques tout au long de ces dernières années. L'élargissement de la gamme et type de capteurs disponible, l'évolution des supports de communications, la diminution de la taille et du coût ont élargies les champs d'application des RCSF. Ces évolutions technologiques nécessitent que chaque noeud doit fonctionner à une consommation limitée pour minimiser la consommation énergétique globale. Ainsi au niveau des **deux premiers chapitres** nous avons essayé d'introduire les réseaux de capteurs sans fil, leur architecture, caractéristiques et contraintes, les différentes topologies et types des RCSF. Dans ces chapitres nous avons pu conclure qu'afin de pouvoir prolonger la durée de vie d'un réseau il faut étudier les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie, les techniques de minimisation, faire une étude sur les protocoles de routages dans les RCSF, leurs critères de performances chose qui nous a permis de déduire notre première contribution d'optimisation énergétiques dans les RCSF. Dans **le chapitre trois**, nous avons expliqué et évalué notre première contribution d'optimisation énergétique dans les RCSF, qui se base sur la proposition d'un protocole de routage utilisant le concept du noeud passerelle. Notre approche proposée offre de meilleures performances en termes de durée de vie du réseau et cela selon les résultats des expérimentations, grâce à l'utilisation du concept du noeud passerelle qui permet de transmettre les données des chefs de groupe à la station de base qui est la destination finale. De plus ces chefs de groupes conservent l'énergie lors de la transmission des données par les noeuds passerelles, et ces derniers passent en mode veille après leur sélection et ne participent pas au regroupement ; ainsi que l'adoption de la rotation des chefs du groupe dans notre approche permet de balancer la consommation énergétique sans oublier l'architecture adoptée qui facilite l'agrégation des données. L'application de notre première contribution dans le domaine médical était l'objectif de la suite de notre travail afin de pouvoir étudier encore plus l'efficacité de notre approche. Dans **le chapitre 4**, nous avons commencé par introduire un état de l'art sur les réseaux corporels sans fils, leur différentes applications, exigences, types, caractéristiques et le point le plus important pour la minimisation de l'énergie, le routage dans ces réseaux corporels sans fils. Puis nous avons enchainé par introduire les différentes nouvelles technologies utilisées lors de la conception des deux protocoles que nous avons

conçues pour les WBANs et qui ont comme but de faciliter la vie quotidienne des patients en surveillant leur état de santé ; en effet, un WBAN permet d'éviter le déplacement de patient à chaque fois à l'hôpital et d'aider à diminuer les états de décès imprévus. Notre conception se base sur l'utilisation du noeud passerelle, les algorithmes de regroupement ainsi que les techniques d'agrégation pour assurer un acheminement fiable de données vers leur destination finale et une consommation minimale d'énergie. Cela a été vérifié par l'évaluation des performances des méthodes proposées dans la fin de chaque partie. Les différentes simulations que nous avons menées ont assuré une optimisation énergétique, ce qui aide à augmenter la stabilité du réseau d'une part ainsi que sa durée de vie d'une autre part. Dans la suite de notre travail, nous avons opté pour un autre domaine d'application des réseaux de capteurs sans fils qui est les systèmes de transport intelligent, par la conception d'une approche hybride ayant comme objectif de garantir la qualité d'information envoyée ainsi que la minimisation de la consommation énergétique du réseau, que nous avons développé au sein du Laboratoire LSI à Madrid. L'approche hybride de communication V2X que nous avons proposé commute entre l'utilisation du Wifi et de la 4G, pour fournir un moyen efficace qui maintient tous types de communications véhiculaire (V2V, V2I et V2P) sur la route en utilisant différentes façons de se connecter au réseau en fonction de sa disponibilité et des différentes configurations préétablies ; ces paramètres répondent à nos exigences énergétiques ainsi que qualitatifs et surtout d'avoir une connexion stable tout le temps quelque-soit l'endroit. Nous avons consacré la fin de ce chapitre à l'évaluation de notre approche hybride de communication, qui est réalisée à l'aide de véritables expériences en utilisant l'iCab, une voiture de golf électrique et autonome, les différents points d'accès Wifi disponibles sur le campus universitaire et une connexion 4G. Les résultats obtenus lors des différentes expériences ont prouvé l'efficacité et l'utilité de notre approche hybride de communication qui aura un impact positif surtout énergétique. Durant ces dernières années, les recherches dans le domaine des RCSF en général et dans celui de l'optimisation de la durée de vie du réseau ne cessent de prendre de l'envergure surtout avec la diversité de leurs domaines d'application. Pour cela plusieurs perspectives s'inscrivent dans le cadre de ce travail, dont nous citerons :

- Approfondir les recherches côté applications des RCSF dans le domaine médical afin de rendre les WBANs plus fiables et pouvoir les utiliser dans des conditions réelles.
- Nous proposons aussi d'appliquer nos approches médicales sur des vrais capteurs dans le but de valider notre travail et voir le comportement de nos protocoles de routage dans les cas réels.

Au niveau du domaine des systèmes de transport intelligent :

- Réaliser d'autres expériences à haute vitesse sur différentes routes.
- Mesurer la puissance du signal 4G et l'inclure aux conditions de la commutation.
- Application de cette approche hybride de communication proposée sur les drones qui sera très utile et aura un impact positif surtout côté énergétique.

Annexes

Les travaux réalisés et présentés dans ce mémoire ont été valorisés dans les publications indiquées ci-dessous :

Revue internationale (5)

1. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Wireless Body Area Networks : A Comprehensive Survey", Soumis à Journal of Medical Engineering & Technology, (pp. 1-11), 2020.
2. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Wireless body area network for health monitoring", Journal of Medical engineering & Technology, vol. 43, no. 2, 124-132, 18 June 2019.
3. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Security in Wireless Sensor Networks", International Journal of Informatics and Communication Technology, vol. 08, no. 1, 13-18, April 2019.
4. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Networks", Journal of Medical engineering & Technology, vol. 42, no. 4, 290-297, 19 May 2018.
5. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Optimization of Energy Consumption with the Gateway Nodes in Wireless Sensor Networks", International Journal of Sensor Wireless Communications and Control, vol. 7, no. 2, 152-160, 1 August 2017.

Book Chapters (1)

- **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Routing Protocols for Wireless Sensor Networks : Survey", Advances in Ubiquitous Computing, (pp. 3-15), 2020.

Conférences nationales et internationales(4)

5. **B. Abidi**, F. M. Moreno, M. EL Haziti, A. Hussein, A. AL Kaff, D. M. Gomez, "Hybrid V2X Communication Approach using WiFi and 4G Connections", 20th IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Madrid-Spain, 12-14 September 2018.

6. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "A New Generation of Wireless Sensors Networks : Wireless Body Area Networks", 5th World Conference on Information Systems and Technologies (WorldCist), Porto Santo Island, Madeira, Portugal, 11-13 April 2017.
7. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Wireless sensor networks in biomedical : Wireless body area networks", Europe and MENA Cooperation Advances in Information and Communication Technologies (EMENA-TSSL), Saïdia-Maroc, 03-05 October 2016.
8. **B. Abidi**, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Evaluation of MCR Protocol for WSNs", Third International Conference on NETworked Systems (NETYS 2015), Agadir-Maroc, 13-15 May 2015.

Papier soumis (1)

- **B. Abidi**, A. AL Kaff, A. Hussein, A. Jilbab, M. EL Haziti, "Minimizing of Energy Consumption using Hybrid V2X Communication Approach for Autonomous Vehicles", Soumis au Journal : Wireless Personal Communications.



BIBLIOGRAPHIE

- [blu,] Specification of the bluetooth system.
- [b, 2011] (July, 2011). Ieee p802. 15-10 wireless personal area networks.
- [a, 2007] (Oct,2007). Ieee p 802.15-07- 0867-04-0 ban. In *15-10-0245-06-0006*.
- [Abbas et al., 2008] Abbas, C. B., González, R., Cardenas, N., and Villalba, L. G. (2008). A proposal of a wireless sensor network routing protocol. *Telecommunication Systems*, 38(1-2) :61–68.
- [Abidi et al., 2017] Abidi, B., Jilbab, A., and El Haziti, M. (2017). Optimization of energy consumption with the gateway nodes in wireless sensor networks. *International Journal of Sensors Wireless Communications and Control*, 7(2) :152–160.
- [Aderohunmu et al., 2009] Aderohunmu, F. A., Deng, J. D., et al. (2009). An enhanced stable election protocol (sep) for clustered heterogeneous wsn. *Department of Information Science, University of Otago, New Zealand*.
- [Akkaya and Younis, 2005] Akkaya, K. and Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3) :325–349.
- [Akyildiz and Stuntebeck, 2006] Akyildiz, I. F. and Stuntebeck, E. P. (2006). Wireless underground sensor networks : Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 4(6) :669–686.
- [Akyildiz et al., 2002a] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002a). A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8) :102–114.
- [Akyildiz et al., 2002b] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002b). Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422.
- [Alghamdi, 2016] Alghamdi, T. A. (2016). Cluster based energy efficient routing protocol for wireless body area networks. *Trends Appl Sci Res*, 11(1) :12–16.
- [Anaya et al., 2014] Anaya, J. J., Merdrignac, P., Shagdar, O., Nashashibi, F., and Naranjo, J. E. (2014). Vehicle to pedestrian communications for protection of vulnerable road users. In *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pages 1037–1042. IEEE.

- [Aslam et al., 2012] Aslam, M., Javaid, N., Rahim, A., Nazir, U., Bibi, A., and Khan, Z. A. (2012). Survey of extended leach-based clustering routing protocols for wireless sensor networks. In *2012 IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems*, pages 1232–1238. IEEE.
- [Association et al., 2016] Association, G. A. et al. (2016). The case for cellular v2x for safety and cooperative driving. *white paper (undated, apparently 23 November 2016)*(available from : <http://5gaa.org/pdfs/5GAA-whitepaper-23-Nov-2016.pdf>).
- [Badreddine and Potop-Butucaru, 2017] Badreddine, W. and Potop-Butucaru, M. (2017). Peak transmission rate resilient crosslayer broadcast for body area networks. *arXiv preprint arXiv:1702.05031*.
- [Bag and Bassiouni, 2006] Bag, A. and Bassiouni, M. A. (2006). Energy efficient thermal aware routing algorithms for embedded biomedical sensor networks. In *2006 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, pages 604–609. IEEE.
- [Bag and Bassiouni, 2008a] Bag, A. and Bassiouni, M. A. (2008a). Hotspot preventing routing algorithm for delay-sensitive applications of in vivo biomedical sensor networks. *Information Fusion*, 9(3) :389–398.
- [Bag and Bassiouni, 2008b] Bag, A. and Bassiouni, M. A. (2008b). Routing algorithm for network of homogeneous and id-less biomedical sensor nodes (rain). In *2008 IEEE Sensors Applications Symposium*, pages 68–73. IEEE.
- [Blazevic et al., 2005] Blazevic, L., Le Boudec, J.-Y., and Giordano, S. (2005). A location-based routing method for mobile ad hoc networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 4(2) :97–110.
- [Braem et al., 2006] Braem, B., Latre, B., Moerman, I., Blondia, C., and Demeester, P. (2006). The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks. In *2006 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems-Workshops*, pages 1–8. IEEE.
- [Brayner et al., 2007] Brayner, A., Lopes, A., Meira, D., Vasconcelos, R., and Menezes, R. (2007). Toward adaptive query processing in wireless sensor networks. *Signal Processing*, 87(12) :2911–2933.
- [Cardiovasculair, 5 30] Cardiovasculair ([Last Accessed : 2019-05-30]). Cardiovascular.
- [Chen et al., 2011] Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., and Leung, V. C. (2011). Body area networks : A survey. *Mobile networks and applications*, 16(2) :171–193.
- [Cheong et al., 2011] Cheong, P., Chang, K.-F., Lai, Y.-H., Ho, S.-K., Sou, I.-K., and Tam, K.-W. (2011). A zigbee-based wireless sensor network node for ultraviolet detection of flame. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(11) :5271–5277.
- [Cho et al., 2009] Cho, W., Kim, S. I., kyun Choi, H., Oh, H. S., and Kwak, D. Y. (2009). Performance evaluation of v2v/v2i communications : The effect of midamble insertion.

- In *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, pages 793–797. IEEE.
- [Chou et al., 2009] Chou, C.-M., Li, C.-Y., Chien, W.-M., and Lan, K.-c. (2009). A feasibility study on vehicle-to-infrastructure communication : Wifi vs. wimax. In *2009 tenth international conference on mobile data management : systems, services and middleware*, pages 397–398. IEEE.
- [de Vicq et al., 2007] de Vicq, N., Robert, F., Penders, J., Gyselinckx, B., and Torfs, T. (2007). Wireless body area network for sleep staging. In *2007 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, pages 163–166. IEEE.
- [Detection, 5 30] Detection, C. ([Last Accessed : 2019-05-30]). Detection cancer.
- [Diabetes, 5 30] Diabetes ([Last Accessed : 2019-05-30]). Diabetes.
- [Dishman, 2004] Dishman, E. (2004). Inventing wellness systems for aging in place. *Computer*, (5) :34–41.
- [Djenouri and Balasingham, 2009] Djenouri, D. and Balasingham, I. (2009). New qos and geographical routing in wireless biomedical sensor networks. In *2009 Sixth International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems*, pages 1–8. IEEE.
- [Doherty et al., 2001] Doherty, L., El Ghaoui, L., et al. (2001). Convex position estimation in wireless sensor networks. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No. 01CH37213)*, volume 3, pages 1655–1663. IEEE.
- [Fahmy et al., 2017] Fahmy, H. M., Baumann, G., El Ghany, M. A. A., and Mostafa, H. (2017). V2v-based vehicle risk assessment and control for lane-keeping and collision avoidance. In *2017 29th International Conference on Microelectronics (ICM)*, pages 1–5. IEEE.
- [Faisal et al., 2013] Faisal, S., Javaid, N., Javaid, A., Khan, M. A., Bouk, S. H., and Khan, Z. A. (2013). Z-sep : Zonal-stable election protocol for wireless sensor networks. *arXiv preprint arXiv :1303.5364*.
- [Fujii et al., 1996] Fujii, H., Hayashi, O., and Nakagata, N. (1996). Experimental research on inter-vehicle communication using infrared rays. In *Proceedings of Conference on Intelligent Vehicles*, pages 266–271. IEEE.
- [García et al., 2013] García, F., Jiménez, F., Anaya, J., Armingol, J., Naranjo, J., and de la Escalera, A. (2013). Distributed pedestrian detection alerts based on data fusion with accurate localization. *Sensors*, 13(9) :11687–11708.
- [Gomez and Paradells, 2010] Gomez, C. and Paradells, J. (2010). Wireless home automation networks : A survey of architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 48(6) :92–101.
- [Halamka, 2006] Halamka, J. (2006). Early experiences with positive patient identification. *Journal of healthcare information management : JHIM*, 20(1) :25.

- [Hamrita and Hoffacker, 2005] Hamrita, T. K. and Hoffacker, E. C. (2005). Development of a smart wireless soil monitoring sensor prototype using rfid technology. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(1) :139–143.
- [Han et al., 2010] Han, X., Cao, X., Lloyd, E. L., and Shen, C.-C. (2010). Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(5) :643–656.
- [Hanlen et al., 2009] Hanlen, L. W., Miniutti, D., Rodda, D., and Gilbert, B. (2009). Interference in body area networks : Distance does not dominate. In *2009 IEEE 20th international symposium on personal, indoor and mobile radio communications*, pages 281–285. IEEE.
- [Hartenstein and Laberteaux, 2010] Hartenstein, H. and Laberteaux, K. (2010). *VA-NET : vehicular applications and inter-networking technologies*, volume 1. Wiley Online Library.
- [Heinzelman et al., 2002] Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., Balakrishnan, H., et al. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4) :660–670.
- [Heinzelman et al., 2000] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*, pages 10–pp. IEEE.
- [Hill et al., 2000] Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., and Pister, K. (2000). System architecture directions for networked sensors. In *ACM SIGOPS operating systems review*, volume 34, pages 93–104. ACM.
- [Hwang et al., 2010] Hwang, J., Shin, C., and Yoe, H. (2010). Study on an agricultural environment monitoring server system using wireless sensor networks. *Sensors*, 10(12) :11189–11211.
- [Intanagonwiwat et al., 2000] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., and Estrin, D. (2000). Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 56–67. ACM.
- [Kargl et al., 2008] Kargl, F., Papadimitratos, P., Buttyan, L., Müter, M., Schoch, E., Wiedersheim, B., Thong, T.-V., Calandriello, G., Held, A., Kung, A., et al. (2008). Secure vehicular communication systems : implementation, performance, and research challenges. *IEEE Communications Magazine*, 46(11).
- [Karl and Willig, 2003] Karl, H. and Willig, A. (2003). A short survey of wireless sensor networks. *Telecommunication Networks Group, Technische Universität Berlin, Hasso-Plattner Institute, Potsdam*.

- [Kim and Choi, 2003] Kim, T. M. and Choi, J. W. (2003). Implementation of inter-vehicle communication system for vehicle platoon experiments via testbed. In *SICE 2003 Annual Conference (IEEE Cat. No. 03TH8734)*, volume 3, pages 3414–3419. IEEE.
- [Kokuti et al., 2017] Kokuti, A., Hussein, A., Marín-Plaza, P., de la Escalera, A., and García, F. (2017). V2x communications architecture for off-road autonomous vehicles. In *2017 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pages 69–74. IEEE.
- [Krishnamachari et al., 2002] Krishnamachari, B., Estrin, D., and Wicker, S. (2002). Modelling data-centric routing in wireless sensor networks. In *IEEE infocom*, volume 2, pages 39–44.
- [Kumar et al., 2002] Kumar, S., Zhao, F., and Shepherd, D. (2002). Collaborative signal and information processing in microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2) :13–14.
- [Kwak et al., 2010] Kwak, K. S., Ullah, S., and Ullah, N. (2010). An overview of iee 802.15. 6 standard. In *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, pages 1–6. IEEE.
- [Latr   et al., 2011] Latr  , B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., and Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks*, 17(1) :1–18.
- [Lewis, 2008] Lewis, D. (2008). 802.15.6 call for applications in body area networks response summary,. *15-08-0407-05-0006*.
- [Li and Tan, 2009] Li, H. and Tan, J. (2009). Heartbeat-driven medium-access control for body sensor networks. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, 14(1) :44–51.
- [Li and Yazdandoost, 2010] Li, H.-B. and Yazdandoost, K. Y. (2010). *Wireless body area network*. River publishers.
- [Li and Liu, 2007] Li, M. and Liu, Y. (2007). Underground structure monitoring with wireless sensor networks. In *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 69–78. ACM.
- [Liang and Balasingham, 2007] Liang, X. and Balasingham, I. (2007). A qos-aware routing service framework for biomedical sensor networks. In *2007 4th International Symposium on Wireless Communication Systems*, pages 342–345. IEEE.
- [Liang et al., 2008] Liang, X., Balasingham, I., and Byun, S.-S. (2008). A reinforcement learning based routing protocol with qos support for biomedical sensor networks. In *2008 First International Symposium on Applied Sciences on Biomedical and Communication Technologies*, pages 1–5. IEEE.
- [Liang et al., 2012] Liang, X., Li, X., Shen, Q., Lu, R., Lin, X., Shen, X., and Zhuang, W. (2012). Exploiting prediction to enable secure and reliable routing in wireless body area networks. In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 388–396. IEEE.

- [Lindsey and Raghavendra, 2002] Lindsey, S. and Raghavendra, C. S. (2002). Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings, IEEE aerospace conference*, volume 3, pages 3–3. IEEE.
- [Liu et al., 2010] Liu, N., Liu, M., Cao, J., Chen, G., and Lou, W. (2010). When transportation meets communication : V2p over vanets. In *2010 IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems*, pages 567–576. IEEE.
- [Love, 2005] Love, R. (2005). Get on the d-bus. *Linux Journal*, 2005(130) :3.
- [Mandal et al., 2005] Mandal, S., Saha, D., and Banerjee, T. (2005). A neural network based prediction model for flood in a disaster management system with sensor networks. In *Proceedings of 2005 International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, 2005.*, pages 78–82. IEEE.
- [Manjeshwar and Agrawal, 2001] Manjeshwar, A. and Agrawal, D. P. (2001). Teen : A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *ipdps*, volume 1, page 189.
- [Maskooki et al., 2011] Maskooki, A., Soh, C. B., Gunawan, E., and Low, K. S. (2011). Opportunistic routing for body area network. In *2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 237–241. IEEE.
- [Merdrignac et al., 2015] Merdrignac, P., Shagdar, O., Jemaa, I. B., and Nashashibi, F. (2015). Study on perception and communication systems for safety of vulnerable road users. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 1876–1881. IEEE.
- [Miller, 2008] Miller, J. (2008). Vehicle-to-vehicle-to-infrastructure (v2v2i) intelligent transportation system architecture. In *2008 IEEE intelligent vehicles symposium*, pages 715–720. IEEE.
- [Moh et al., 2005] Moh, M., Culpepper, B. J., Dung, L., Moh, T.-S., Hamada, T., and Su, C.-F. (2005). On data gathering protocols for in-body biomedical sensor networks. In *GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005.*, volume 5, pages 6–pp. IEEE.
- [Movassaghi et al., 2012] Movassaghi, S., Abolhasan, M., and Lipman, J. (2012). Energy efficient thermal and power aware (etpa) routing in body area networks. In *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications- (PIMRC)*, pages 1108–1113. IEEE.
- [Movassaghi et al., 2013] Movassaghi, S., Abolhasan, M., and Lipman, J. (2013). A review of routing protocols in wireless body area networks. *Journal of Networks*.
- [Msadaa et al., 2010] Msadaa, I. C., Cataldi, P., and Filali, F. (2010). A comparative study between 802.11 p and mobile wimax-based v2i communication networks. In *2010 fourth international conference on next generation mobile applications, services and technologies*, pages 186–191. IEEE.

- [Mundada et al., 2012] Mundada, M. R., CyrilRaj, V., and Bhuvaneswari, T. (2012). Energy aware multi-hop multi-path hierarchical (eammh) routing protocol for wireless sensor networks. *European Journal of Scientific Research*, 88(4) :520–530.
- [Muñoz-Gea et al., 2013] Muñoz-Gea, J. P., Manzanares-Lopez, P., Malgosa-Sanahuja, J., and Garcia-Haro, J. (2013). Design and implementation of a p2p communication infrastructure for wsn-based vehicular traffic control applications. *Journal of Systems Architecture*, 59(10) :923–930.
- [Namgoong et al., 2005] Namgoong, H., Lee, D., and Nam, D. (2005). Energy efficient topology for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pages 25–33. ACM.
- [Narayanaswamy et al., 2002] Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R. S., and Kumar, P. (2002). Power control in ad-hoc networks : Theory, architecture, algorithm and implementation of the compow protocol. In *European wireless conference*, volume 2002, page 156162. Florence, Italy.
- [Naregal and Gudnavar, 2012] Naregal, K. and Gudnavar, A. (2012). Improved cluster routing protocol for wireless sensor network through simplification. In *2012 18th International Conference on Advanced Computing and Communications (ADCOM)*, pages 1–3. IEEE.
- [Natarajan et al., 2007] Natarajan, A., Motani, M., de Silva, B., Yap, K.-K., and Chua, K. C. (2007). Investigating network architectures for body sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments*, pages 19–24. ACM.
- [Nehmer et al., 2006] Nehmer, J., Becker, M., Karshmer, A., and Lamm, R. (2006). Living assistance systems : an ambient intelligence approach. In *Proceedings of the 28th international conference on Software engineering*, pages 43–50. ACM.
- [Nekoogar et al., 2004] Nekoogar, F., Dowla, F., and Spiridon, A. (2004). Self organization of wireless sensor networks using ultra-wideband radios. In *Proceedings. 2004 IEEE Radio and Wireless Conference (IEEE Cat. No. 04TH8746)*, pages 451–454. IEEE.
- [Ni et al., 2009] Ni, Y., Xia, Y., Liao, W., and Ko, J. (2009). Technology innovation in developing the structural health monitoring system for guangzhou new tv tower. *Structural Control and Health Monitoring : The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 16(1) :73–98.
- [Organization, 2018] Organization, W. H. ([Last Accessed : 30-05-2018]). Who global status report on road safety, 2016.
- [Otto et al., 2006] Otto, C., Milenkovic, A., Sanders, C., and Jovanov, E. (2006). System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring. *Journal of mobile multimedia*, 1(4) :307–326.

- [Papadimitratos et al., 2009] Papadimitratos, P., Fortelle, A. L., Evenssen, K., Brignolo, R., and Cosenza, S. (2009). Vehicular communication systems : Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation. *IEEE communications magazine*, 47(11) :84–95.
- [Park and Srivastava, 1999] Park, S. and Srivastava, M. (1999). Power aware routing in sensor networks using dynamic source routing. *ACM MONET Special Issue on Energy Conserving Protocols in Wireless Networks*, 5 :2.
- [Parks et al., 2013] Parks, A. N., Sample, A. P., Zhao, Y., and Smith, J. R. (2013). A wireless sensing platform utilizing ambient rf energy. In *2013 IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems*, pages 154–156. IEEE.
- [Perera et al., 2014] Perera, C., Zaslavsky, A., Liu, C. H., Compton, M., Christen, P., and Georgakopoulos, D. (2014). Sensor search techniques for sensing as a service architecture for the internet of things. *IEEE Sensors Journal*, 14(2) :406–420.
- [Pister, 1999] Pister, K. S. (1999). Smart dust : Wireless networks of millimeter-scale sensor nodes. *Highlight Article in 1999 Electronics Research Laboratory Research Summary*.
- [Qing et al., 2006] Qing, L., Zhu, Q., and Wang, M. (2006). Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. *Computer communications*, 29(12) :2230–2237.
- [Qt, 5 30] Qt ([Last Accessed : 2018-05-30]). Qt network.
- [Quigley et al., 2009] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., and Ng, A. Y. (2009). Ros : an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5. Kobe, Japan.
- [Quwaider and Biswas, 2010] Quwaider, M. and Biswas, S. (2010). Dtn routing in body sensor networks with dynamic postural partitioning. *Ad Hoc Networks*, 8(8) :824–841.
- [Raw and Das, 2011] Raw, R. S. and Das, S. (2011). Performance comparison of position based routing protocols in vehicle-to-vehicle (v2v) communication. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(1) :435–444.
- [Razzaque et al., 2011] Razzaque, M., Hong, C. S., Lee, S., et al. (2011). Data-centric multiobjective qos-aware routing protocol for body sensor networks. *Sensors*, 11(1) :917–937.
- [Rehena et al., 2011] Rehena, Z., Roy, S., and Mukherjee, N. (2011). A modified spin for wireless sensor networks. In *2011 Third International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2011)*, pages 1–4. IEEE.
- [Rodoplu and Meng, 1998] Rodoplu, V. and Meng, T. H. (1998). Minimum energy mobile wireless networks. In *ICC'98. 1998 IEEE International Conference on Communications. Conference Record. Affiliated with SUPERCOMM'98 (Cat. No. 98CH36220)*, volume 3, pages 1633–1639. IEEE.

- [Salim et al., 2014] Salim, A., Osamy, W., and Khedr, A. M. (2014). Ibleach : intra-balanced leach protocol for wireless sensor networks. *Wireless networks*, 20(6) :1515–1525.
- [Santa et al., 2008] Santa, J., Gómez-Skarmeta, A. F., and Sánchez-Artigas, M. (2008). Architecture and evaluation of a unified v2v and v2i communication system based on cellular networks. *Computer Communications*, 31(12) :2850–2861.
- [Santi, 2005] Santi, P. (2005). Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM computing surveys (CSUR)*, 37(2) :164–194.
- [Shah and Rabaey, 2002] Shah, R. C. and Rabaey, J. M. (2002). Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In *2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No. 02TH8609)*, volume 1, pages 350–355. IEEE.
- [Shah and Yarvis, 2006] Shah, R. C. and Yarvis, M. (2006). Characteristics of on-body 802.15. 4 networks. In *2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, pages 138–139. IEEE.
- [Sharma et al., 2015] Sharma, R., Ryait, H. S., and Gupta, A. K. (2015). Performance analysis of attempt, simple and deec routing protocols in wban. *Int. J. Latest Trend Eng. Technol.(IJLTET)*, 6(2) :133–139.
- [Sharma and Jena, 2011] Sharma, S. and Jena, S. K. (2011). A survey on secure hierarchical routing protocols in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2011 international conference on communication, computing & security*, pages 146–151. ACM.
- [Singelée et al., 2008] Singelée, D., Latré, B., Braem, B., Peeters, M., De Soete, M., De Cleyne, P., Preneel, B., Moerman, I., and Blondia, C. (2008). A secure cross-layer protocol for multi-hop wireless body area networks. In *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, pages 94–107. Springer.
- [Singh and Raghavendra, 1998] Singh, S. and Raghavendra, C. S. (1998). Pamas power aware multi access protocol with signalling for ad hoc networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 28(3) :5–26.
- [Sivakumar and Radhika, 2018] Sivakumar, P. and Radhika, M. (2018). Performance analysis of leach-ga over leach and leach-c in wsn. *Procedia Computer Science*, 125 :248–256.
- [Smaragdakis et al., 2004] Smaragdakis, G., Matta, I., and Bestavros, A. (2004). Sep : A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. Technical report, Boston University Computer Science Department.
- [Subramanian, 2004] Subramanian, N. V. (2004). Survey on energy-aware routing and routing protocols for sensor networks. *Technical Report, Computer Science*.
- [Sukor et al., 2008] Sukor, M., Ariffin, S., Fisal, N., Yusof, S. S., and Abdallah, A. (2008). Performance study of wireless body area network in medical environment. In *2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*, pages 202–206. IEEE.

- [Tachtatzis et al., 2010] Tachtatzis, C., Di Franco, F., Tracey, D. C., Timmons, N. F., and Morrison, J. (2010). An energy analysis of iee 802.15. 6 scheduled access modes. In *2010 IEEE Globecom Workshops*, pages 1270–1275. IEEE.
- [Takahashi et al., 2008] Takahashi, D., Xiao, Y., Hu, F., Chen, J., and Sun, Y. (2008). Temperature-aware routing for telemedicine applications in embedded biomedical sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2008 :26.
- [Tang et al., 2005a] Tang, Q., Tummala, N., Gupta, S. K., and Schwiebert, L. (2005a). Communication scheduling to minimize thermal effects of implanted biosensor networks in homogeneous tissue. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52(7) :1285–1294.
- [Tang et al., 2005b] Tang, Q., Tummala, N., Gupta, S. K., and Schwiebert, L. (2005b). Tara : thermal-aware routing algorithm for implanted sensor networks. In *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pages 206–217. Springer.
- [Ullah et al., 2008] Ullah, S., Higgin, H., Siddiqui, M. A., and Kwak, K. S. (2008). A study of implanted and wearable body sensor networks. In *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems : Technologies and Applications*, pages 464–473. Springer.
- [Ullah et al., 2012] Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., Saleem, S., Rahman, Z., and Kwak, K. S. (2012). A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of medical systems*, 36(3) :1065–1094.
- [Ullah et al., 2010] Ullah, S., Khan, P., Ullah, N., Saleem, S., Higgins, H., and Kwak, K. S. (2010). A review of wireless body area networks for medical applications. *arXiv preprint arXiv :1001.0831*.
- [Đurišić et al., 2012] Đurišić, M. P., Tafa, Z., Dimić, G., and Milutinović, V. (2012). A survey of military applications of wireless sensor networks. In *2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO)*, pages 196–199. IEEE.
- [Wang and Park, 2009] Wang, S. and Park, J.-T. (2009). Modeling and analysis of multi-type failures in wireless body area networks with semi-markov model. *IEEE Communications Letters*, 14(1) :6–8.
- [Watteyne et al., 2007] Watteyne, T., Augé-Blum, I., Dohler, M., and Barthel, D. (2007). Anybody : a self-organization protocol for body area networks. In *Proceedings of the ICST 2nd international conference on Body area networks*, page 6. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics).
- [WDF, 5 30] WDF ([Last Accessed : 2019-05-30]). World diabetes fondation.
- [Wheeler, 2007] Wheeler, A. (2007). Commercial applications of wireless sensor networks using zigbee. *IEEE Communications Magazine*, 45(4) :70–77.

- [Xu et al., 2012] Xu, J., Jin, N., Lou, X., Peng, T., Zhou, Q., and Chen, Y. (2012). Improvement of leach protocol for wsn. In *2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, pages 2174–2177. IEEE.
- [Xu et al., 2004] Xu, Q., Mak, T., Ko, J., and Sengupta, R. (2004). Vehicle-to-vehicle safety messaging in dsrc. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 19–28. ACM.
- [Xu et al., 2001] Xu, Y., Heidemann, J., and Estrin, D. (2001). Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 70–84. ACM.
- [Yu et al., 2001] Yu, Y., Govindan, R., and Estrin, D. (2001). Geographical and energy aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks.
- [Zasowski et al., 2003] Zasowski, T., Althaus, F., Stager, M., Wittneben, A., and Troster, G. (2003). Uwb for noninvasive wireless body area networks : Channel measurements and results. In *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003*, pages 285–289. IEEE.
- [Zhang et al., 2010] Zhang, A., Smith, D. B., Miniutti, D., Hanlen, L. W., Rodda, D., and Gilbert, B. (2010). Performance of piconet co-existence schemes in wireless body area networks. In *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, pages 1–6. IEEE.
- [Zhen et al., 2008] Zhen, B., Patel, M., Lee, S., Won, E., and Astrin, A. (2008). Tg6 technical requirements document (trd) ieee p802. 15-08-0644-09-0006. *Tech. Rep.*
- [Zhou et al., 2016] Zhou, Y., Wang, X., Wang, T., Liu, B., and Sun, W. (2016). Fault-tolerant multi-path routing protocol for wsn based on heed. *International Journal of Sensor Networks*, 20(1) :37–45.
- [Ziane and Mellouk, 2005] Ziane, S. and Mellouk, A. (2005). A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad hoc networks. In *2005 Systems Communications (ICW'05, ICHSN'05, ICMCS'05, SENET'05)*, pages 2–6. IEEE.

