

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Télécommunications

Spécialité : Communications et réseaux sans fil

Par : Sidhoum Lamia

Sujet

L'internet des objets dans l'ambulance intelligente et la médecine d'urgence

Soutenue publiquement, le 18 / 12 / 2024 , devant le jury composé de :

Mr. KADRI Benamar	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr. MERZOUGUI Rachid	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Mr. HADJILA Mourad	MCA	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de thèse
Mr. ZERROUKI Hadj	MCA	Univ. Sidi Bel Abbes	Examineur
Mr. MOUSSAOUI Djilali	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2024 - 2025

Résumé

L'Internet des Objets a révolutionné le domaine médical, notamment en médecine d'urgence, grâce à des dispositifs connectés capables de surveiller en continu les patients. Les ambulances intelligentes, munies de capteurs avancés et de systèmes de communication sophistiqués, ont un rôle essentiel en fournissant des informations en temps réel sur l'état des patients. Les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN) sont essentiels pour ces systèmes, mais leur déploiement est freiné par la faible durée de vie des capteurs due à la capacité limitée de leurs batteries. L'objectif principal de cette thèse est d'améliorer l'efficacité énergétique des WBANs afin de prolonger leur durée de vie, en présentant deux contributions principales. La première s'appuie sur la sélection des chefs de cluster, nous suggérons de comparer deux algorithmes : CHSFL et Improved CHSFL. Les algorithmes sont basés sur le clustering pour les réseaux WBAN en utilisant l'une des célèbres méthodes Fuzzy C-Means pour le clustering des nœuds. Les résultats de simulation montrent que l'Improved CHSFL prolonge la durée de vie du réseau d'environ 34 % par rapport au CHSFL. La seconde contribution explore la formation de chaînes de capteurs pour optimiser la transmission des données et réduire la consommation énergétique. Nous proposons trois approches basées sur la formation d'une chaîne de nœuds capteurs à l'aide d'une matrice de distances. La première approche est basée sur la formation d'une chaîne unique en utilisant les distances les plus courtes. La deuxième et la troisième consistent à changer la position du puits en formant un seul cluster en utilisant la méthode Fuzzy C-Means et le centre de ce dernier constitue la nouvelle position du puits. En comparaison avec RE-ATTEMPT et PSOBAN, la troisième approche proposée a permis une économie d'énergie remarquable, qui peut avoir un impact important sur la durée de vie totale du réseau.

Mots clés : internet des objets, ambulance intelligente, WBAN, consommation énergétique, protocoles de routage, durée de vie du réseau.

Abstract

The Internet of Things has revolutionized the medical field, especially in emergency medicine, thanks to connected devices capable of continuously monitoring patients. Smart ambulances, equipped with advanced sensors and sophisticated communication systems, have a vital role in providing real-time information on the condition of patients. Wireless body area networks

(WBANs) are essential for these systems, but their deployment is hampered by the short lifetime of the sensors due to the limited capacity of their batteries. The main objective of this thesis is to improve the energy efficiency of WBANs in order to extend their lifetime, by presenting two main contributions. The first one is based on the selection of cluster heads, we suggest comparing two algorithms: CHSFL and Improved CHSFL. The algorithms are based on clustering for WBAN networks using one of the famous Fuzzy C-Means methods for node clustering. Simulation results show that Improved CHSFL extends the network lifetime by about 34% compared to CHSFL. The second contribution explores the formation of a chain of sensor nodes to optimize data transmission and reduce energy consumption. We propose three approaches based on the formation of a chain of sensor nodes using a matrix of distances. The first approach is based on forming a single chain using the shortest distances. The second and the third consist in changing the position of the sink by forming a single cluster using the Fuzzy C-Means method and the center of the latter constitutes the new position of the sink. In comparison to RE-ATTEMPT and PSOBAN, the third proposed chain-based approach has enabled a remarkable energy savings, which may have a big impact on the network's entire lifespan.

Keywords: Internet of Things, Smart Ambulance, WBAN, Energy Consumption, Routing Protocols, and Network Lifetime.

Remerciements

Au nom d'ALLAH, le Tout-Puissant, pour sa guidance et ses bénédictions sans lesquelles ce travail n'aurait jamais pu voir le jour. C'est avec une immense gratitude que je remercie ALLAH pour la force et la persévérance qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de thèse, le Pr. Rachid MERZOUGUI, qui m'a offert l'opportunité d'explorer ce domaine passionnant. Ma plus sincère gratitude va à mon codirecteur de thèse, Dr. Mourad HADJILA, Je lui suis profondément reconnaissante pour son accompagnement académique inestimable, sa disponibilité, ses encouragements constants et son soutien tout au long de ce travail

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance la plus profonde.

Mes pensées et mes remerciements vont aussi à ma famille bien-aimée, qui m'a soutenu sans relâche avec amour et patience, ainsi qu'à toutes les personnes, proches, amis et collègues, qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de cette thèse. Que chacun reçoive ici l'expression de ma reconnaissance la plus sincère.

Merci à tous.

Table des matières

Remerciements	iv
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	x
Introduction générale	11
I Chapitre I : Les réseaux WBANs dans l’ambulance intelligente et la médecine d’urgence.....	15
I.1 Introduction.....	16
I.2 Architecture des réseaux WBANs	16
I.2.1 Architecture de communication dans les réseaux WBANs.....	17
I.3 Topologies des réseaux WBANs	18
I.3.1 Topologie point à point	19
I.3.2 Topologie en étoile.....	19
I.3.3 Topologie en maille.....	19
I.3.4 Topologie en arbre	19
I.4 Les nœuds capteurs	20
I.4.1 Types d’équipements	20
I.4.2 Architecture d’un nœud capteur	21
I.4.3 Systèmes d’exploitation pour les nœuds capteur.....	22
I.4.4 Pile protocolaire	23
I.5 Standards et technologies utilisés dans les réseaux WBANs.....	25
I.5.1 Les standards IEEE.802.....	26
I.5.2 Les technologies LPWAN	29
I.6 Le problème de consommation d’énergie	32
I.6.1 Etat de nœud capteur.....	33
I.6.2 Optimisation de la consommation d’énergie.....	33
I.7 Le réseau WBAN dans la médecine d’urgence.....	34
I.7.1 L’ambulance intelligente.....	34
I.8 Conclusion	37
II Chapitre II : le routage dans l’internet des objets	39
II.1 Introduction.....	40
II.2 Internet des objets	40
II.2.1 Définition.....	40
II.2.2 Définition d’un objet	40

II.3	Architecture de l’IoT.....	41
II.3.1	Capteurs et actionneurs	41
II.3.2	Passerelles et réseaux	41
II.3.3	Stockage et traitement des données	41
II.4	Le Cloud computing.....	42
II.4.1	Définition.....	42
II.4.2	Architecture du Cloud Computing	43
II.4.3	Les formes de services.....	45
II.5	Fog Computing.....	46
II.5.1	Définition.....	46
II.5.2	Architecture et éléments d’une infrastructure Fog Computing.....	47
II.5.3	La communication dans une infrastructure Fog Computing	48
II.6	Définition du routage dans l’IoT.....	49
II.7	Types de protocoles de routage.....	49
II.7.1	Basé sur la topologie du réseau.....	50
II.7.2	Basé sur l’itinéraire établi entre la source et la destination.....	52
II.7.3	Basé sur le mode de fonctionnement de protocole.....	53
II.7.4	Basé sur la diffusion.....	54
II.7.5	Basé sur l’optimisation par des algorithmes heuristiques	55
II.8	Protocoles de routage de la couche réseau.....	56
II.8.1	RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks).....	56
II.8.2	CORPL (Cognitive Opportunistic Routing Protocol using RPL)	57
II.8.3	CTP (Collection Tree Protocol).....	58
II.8.4	LOADng (Lightweight On-demand Ad hoc Distance Vector Routing Protocol - Next Generation).....	58
II.8.5	CARP (Channel-aware Routing Protocol)	59
II.9	Défis de routage dans l’IoT	60
II.9.1	Interopérabilité.....	60
II.9.2	Sécurité.....	61
II.9.3	Mobilité	61
II.9.4	Gestion de l’énergie :.....	61
II.9.5	Latence et temps réel	62
II.9.6	Fiabilité du réseau	62

II.10	Applications de l’IoT.....	63
II.11	Applications de l’IoT dans la santé.....	64
II.12	Conclusion	64
III	Chapitre III : Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil corporels.....	66
III.1	Introduction.....	67
III.2	Le routage dans les WBANs.....	67
III.3	Critères de conception des protocoles de routage pour un réseau WBAN.....	68
III.3.1	Consommation énergétique.....	68
III.3.2	Fiabilité et tolérance aux pannes.....	69
III.3.3	Latence et délai de transmission	69
III.3.4	Sécurité et confidentialité.....	70
III.3.5	Adaptabilité et scalabilité	70
III.3.6	Comptabilité avec les normes existantes	70
III.4	Protocoles de routage dans les réseaux WBANs	71
III.4.1	Les protocoles à base de température	71
III.4.2	Les protocoles à base de qualité de service	75
III.4.3	Les protocoles à base de posture.....	78
III.4.4	Les protocoles Cross-layer	81
III.4.5	Protocoles à base de cluster	84
III.5	Conclusion	87
IV	Chapitre IV (Contributions) : Protocoles de routage à base de cluster et de chaine.....	89
IV.1	Introduction.....	90
IV.2	Contribution 1 : Algorithme d’élection des chefs de cluster basé sur la logique floue pour améliorer la durée de vie du WBAN	90
IV.2.1	Présentation de l’algorithme.....	90
IV.2.2	Simulation	97
IV.2.3	Résultats et discussion.....	99
IV.3	Contribution 2 : Approche de routage à base de chaine pour améliorer la durée de vie des réseaux corporels sans fil	103
IV.3.1	Présentation de l’approche	103
IV.3.2	Simulation et évaluation	105
IV.3.3	Etude comparative.....	110
IV.4	Conclusion	113

Conclusion générale.....114
BIBLIOGRAPHIE.....116

Liste des figures

Figure I.1. Architecture à trois niveaux de WBAN.....	17
Figure I.2. Topologies des WBANS	18
Figure I.3. Architecture d'un nœud capteur.....	22
Figure I.4. La pile protocolaire dans un réseau de capteur	25
Figure I.5. Standards et technologies de communications dans les WBANS.....	25
Figure I.6. Caractéristiques des standards IEEE utilisés par les WBANS	26
Figure I.7. Architecture LoRa	30
Figure I.8. Architecture d'une ambulance intelligente.	35
Figure I.9. Extension de portée via un réseau cellulaire multi-sauts.....	37
Figure II.1. Architecture IoT	42
Figure II.2. Architecture du Cloud Computing	44
Figure II.3. Les principaux fournisseurs d'IAAS, PAAS et SAAS	46
Figure II.4. Illustration de l'évolution de l'architecture Cloud vers le Fog	47
Figure II.5. Vue globale de l'architecture hiérarchique 3 tiers du Fog Computing	48
Figure II.6. Type de protocoles de routage dans l'IoT	50
Figure III.1. Routage dans le WBAN	68
Figure III.2. Catégories de protocoles de routage pour les WBANS.....	71
Figure IV.1. Système d'inférence floue de type MAMDANI.....	93
Figure IV.2. Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée « énergie résiduelle ».....	95
Figure IV.3. Fonctions d'appartenance à la variable d'entrée « distance par rapport au sink1 ».....	95
Figure IV.4. Fonctions d'appartenance à la variable de sortie «PCHE».....	96
Figure IV.5. Topologie du réseau (CHSFL).....	98
Figure IV.6. Topologie du réseau (Improved- CHSFL).....	99
Figure IV.7. Énergie résiduelle consommée par les deux algorithmes.....	100
Figure IV.8. Nombre de nœuds vivants pour les deux algorithmes.....	101
Figure IV.9. First Node Dead and Last Node Dead.....	101
Figure IV.10. Nombre de transmissions par nœud (CHSFL).....	102
Figure IV.11. Nombre de transmissions par nœud (Improved-CHSFL).....	102
Figure IV.12. Construction en chaîne sans déplacer le sink.	106
Figure IV.13. Énergie résiduelle de la 1ère approche.....	107
Figure IV.14. Nombre de nœuds vivants de la 1ère approche.	107
Figure IV.15. Construction de la chaîne en déplaçant le sink vers (0.3, 0.7).....	108
Figure IV.16. Énergie résiduelle de la 2ème approche.....	108
Figure IV.17. Nombre de nœuds vivants de la 2ème approche.	109
Figure IV.18. Construction de la chaîne en déplaçant le sink vers (0.4, 0.7).....	110
Figure IV.19. Nombre de nœuds morts vs. Nombre de tours.	112
Figure IV.20. Énergie résiduelle vs. Nombre de tours.	112

Liste des tableaux

Tableau IV.1. Paramètres de simulation..... 98
Tableau IV.2. Analyse comparative du PROPOSED 3 et de ses concurrents en termes de divers paramètres.....111

Introduction générale

L'Internet des Objets (IoT) transforme profondément le domaine médical en permettant la création de dispositifs interconnectés capables de surveiller, diagnostiquer, et même traiter les patients en temps réel. Cette technologie ouvre la voie à une médecine plus personnalisée, proactive et préventive, réduisant ainsi les coûts et augmentant la qualité des soins. L'IoT est un concept qui implique la connexion de tous les individus, de tous les objets, de tous les services et des réseaux à tout moment et en tout endroit [1]. Il est possible que l'objet dans l'internet des objets soit une personne équipée d'un moniteur cardiaque ou d'une voiture équipée de capteurs intégrés, c'est-à-dire des objets qui ont reçu une adresse IP et qui peuvent collecter et transférer des données sur un réseau sans avoir besoin d'assistance ou d'intervention manuelle [2].

Grâce à l'Internet des Objets, de nombreux domaines sont transformés, y compris la santé, où il offre la possibilité de concevoir des environnements intelligents tels que les ambulances connectées. Avec leurs capteurs sophistiqués et leurs systèmes de communication avancés, ces ambulances sont censées améliorer considérablement la qualité des soins d'urgence en fournissant des informations en temps réel sur l'état des patients. L'intégration de l'IoT dans la médecine d'urgence permet non seulement de surveiller les signes vitaux des patients durant le transport, mais aussi de préparer l'équipe médicale à l'hôpital pour une intervention immédiate.

Toutefois, l'efficacité de ces systèmes repose principalement sur les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN), qui permettent de recueillir et de transmettre des informations médicales indispensables telles que : la pression artérielle, la température, l'ECG (électrocardiographie), l'EEG (électroencéphalographie), etc. Les informations recueillies seront par la suite envoyées vers un point de collecte désigné sous le nom de sink. Ce dernier se charge de traiter ces informations, pouvant soit prendre des décisions autonomes, soit transmettre des alertes par

Internet à un centre de surveillance distant, où elles seront stockées, analysées et examinées plus en détail. Tous les nœuds capteurs ne peuvent pas atteindre le sink en un seul saut. Afin de garantir la connectivité du réseau, il est fréquent que les capteurs doivent transmettre leurs données en multi- sauts. La recherche et le maintien des routes dans les réseaux de capteurs sont une tâche importante, car les contraintes énergétiques et les changements soudains dans l'état des nœuds (comme les pannes) entraînent des modifications topologiques fréquentes et imprévisibles.

L'emploi des WBANs dans le domaine médical présente de nombreux avantages et peut entraîner une diminution significative des frais d'hospitalisation des patients. Son objectif est de réduire le temps de présence du personnel médical, en particulier étant donné l'augmentation continue des personnes âgées [3], des maladies et des accidents à travers le monde. La durée de vie des capteurs médicaux est l'un des principaux défis auxquels ces réseaux font face, en raison de la petite taille des batteries intégrées. Cette limitation énergétique constitue un frein important au déploiement à grande échelle des WBAN dans les applications de médecine d'urgence, où la fiabilité et la continuité des données sont cruciales.

Face à cette problématique, il est essentiel de trouver des solutions novatrices afin de prolonger la durée de vie des réseaux WBAN, tout en préservant la qualité et la fiabilité des données transmises. Pour réduire la consommation d'énergie, les techniques de routage suggérées dans la littérature pour les réseaux de capteurs corporels utilisent des stratégies de routage bien connues ainsi que des techniques spécifiques pour les réseaux de capteurs corporels. Les protocoles de communication (protocoles de routage) peuvent garantir cela, ce qui explique la nécessité de créer de nouveaux protocoles de routage efficaces qui répondent à ces exigences.

Différents protocoles de routage pour les WBANs ont été suggérés, ces protocoles sont répartis en cinq catégories [4] : à base de température, à base de qualité de service, à base de posture, cross-layer, et à base de cluster.

L'un des moyens proposés pour faire face aux limitations des capteurs est l'organisation hiérarchique des capteurs, qui consiste à les regrouper et à leur attribuer des tâches spécifiques dans le groupe avant de transférer l'information à des niveaux plus élevés. Ce processus est appelé regroupement ou clustering. En général, la formation de clusters dans un WBAN est effectuée en prenant en considération la proximité entre les capteurs, mesurée par le signal

radiofréquence qu'ils émettent. Chaque groupe comprend un chef (Cluster Head : CH), qui est le nœud qui communique directement avec le sink pour recueillir les données des capteurs médicaux. En prenant des responsabilités au sein d'une hiérarchie de cluster, les nœuds d'un WBAN ont la capacité de superviser les activités qu'ils mènent, ce qui permet de diminuer leur consommation d'énergie. Cependant, il est difficile de choisir entre agir uniquement en tant que fournisseur de données ou en tant que passerelle (CH) reliant les nœuds au sink. Il est essentiel de prendre en compte divers éléments, tels que la puissance du signal, la planification des transmissions et la position des nœuds, pour prendre cette décision.

Devant ces contraintes, il est essentiel de concevoir des solutions novatrices afin de prolonger la durée de vie des réseaux WBAN, tout en préservant la qualité et la fiabilité des données transmises. Dans ce cadre, notre thèse propose d'explorer deux stratégies visant à optimiser l'efficacité énergétique des capteurs médicaux utilisés dans les ambulances intelligentes, en s'appuyant sur les dernières avancées technologiques dans le domaine de l'IoT et des réseaux sans fil. La première stratégie repose sur la sélection des CHs, qui revêt une importance capitale dans la conception des protocoles de routage. Nous proposons un algorithme d'élection des chefs de cluster basé sur la logique floue afin d'améliorer la durée de vie des réseaux WBAN. Dans la seconde, nous examinons une autre stratégie qui repose sur les chaînes. Dans cette proposition, nous proposons trois approches basées sur la formation d'une chaîne utilisant une matrice de distances. Nous montrons que l'une de ces approches est efficace en terme de prolongation de durée de vie du réseau.

L'organisation de la thèse repose sur une structure claire, composée de quatre chapitres principaux.

Le **premier chapitre** s'intitule *Les réseaux WBANs dans l'ambulance intelligente et la médecine d'urgence*. Il commence par une **introduction** qui présente l'importance des WBANs dans ce domaine. Ensuite, il détaille l'**architecture des réseaux WBANs**, en se focalisant sur les différentes topologies possibles, telles que la topologie point à point, en étoile, en maille, ou en arbre. Le chapitre explore aussi les **nœuds capteurs**, leur architecture, leurs systèmes d'exploitation, et les piles protocolaires. Puis, il analyse les **standards et les technologies** comme IEEE.802 et LPWAN, avant de se concentrer sur le **problème de consommation d'énergie** et les

méthodes d'optimisation. Enfin, ce chapitre aborde l'intégration des WBANs dans la médecine d'urgence, en particulier dans le contexte de **l'ambulance intelligente**.

Le **deuxième chapitre** explore *le routage dans l'Internet des Objets (IoT)*. Après une **introduction**, il définit **l'IoT et ses composants**, puis détaille son architecture, incluant les capteurs, passerelles, réseaux, et le traitement des données. Les concepts du **Cloud Computing** et du **Fog Computing** y sont également expliqués, en mettant en avant leurs rôles et architectures respectives. Ensuite, il introduit **le routage dans l'IoT** en classifiant les protocoles selon divers critères. Des **protocoles spécifiques** sont analysés, ainsi que les **défis du routage**, tels que la sécurité, la mobilité et l'efficacité énergétique. Le chapitre conclut par une présentation des **applications de l'IoT**, notamment dans la santé.

Le **troisième chapitre** est consacré aux *Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil corporels*. Après une **introduction**, ce chapitre décrit les différents **critères de conception des protocoles de routage**, tels que la consommation énergétique, la fiabilité, la latence et la sécurité. Il passe ensuite en revue plusieurs **protocoles de routage** spécifiques aux WBANs, comme les protocoles basés sur la température, la qualité de service, la posture, les approches cross-layer, et ceux à base de cluster.

Le **quatrième chapitre**, axé sur les **contributions**, présente des solutions innovantes pour améliorer la durée de vie des WBANs à travers des **protocoles de routage à base de cluster et de chaîne**. Il propose un premier algorithme d'élection des chefs de cluster basé sur la logique floue, suivi d'une simulation et d'une discussion des résultats. Une seconde contribution est ensuite détaillée, présentant une **approche de routage à base de chaîne**, accompagnée de simulations, d'évaluations et d'une étude comparative.

Finalement, la thèse se termine par une conclusion générale qui rappelle les différentes contributions élaborées dans le cadre de ce travail de recherche et présente quelques perspectives ouvrant la voie à de futures recherches.

Chapitre I : Les réseaux WBANs dans l'ambulance intelligente et la médecine d'urgence

I.1 Introduction

L'accroissement des problèmes de santé à l'échelle mondiale a généré une demande croissante envers les services de santé et les systèmes d'intervention médicale d'urgence. Les méthodes conventionnelles de diagnostic se sont avérées inadéquates pour faire face à cette demande croissante. La surveillance à distance de la santé en temps réel se présente comme une solution intelligente et efficace, offrant une détection continue de tout problème de santé chez le patient [5]. Les avancées dans les technologies de communication sans fil tel que l'internet des objets et les dispositifs connectés ont catalysé le progrès des services de soins de santé et de médecine d'urgence. Le réseau corporel sans fil (WBAN) se distingue comme une technologie émergente susceptible d'optimiser la prestation des soins de santé et le suivi des maladies. Il offre également un soutien précieux au personnel médical en facilitant les diagnostics et en fournissant les directives médicales nécessaires. Un système d'ambulance intelligente basé sur un réseau de dispositifs médicaux connectés, de capteurs sans fils (WBAN) et de dispositifs d'assistance portables portés par les ambulanciers paramédicaux représentera aussi un avantage important pour la médecine d'urgence, en fournissant un diagnostic et un traitement efficaces sur les lieux ou préparés préalablement avant l'arrivée du patient à l'hôpital.

I.2 Architecture des réseaux WBANs

Un réseau de capteurs corporels sans fil est un réseau de minuscules capteurs portables ou implantés dans le corps humain. Chaque nœud biocapteur est capable de détecter une ou plusieurs paramètres physiologiques du corps humain. Les nœuds de capteurs stockent les données de mesure, qui sont ensuite transmises au puits en utilisant des liaisons de communication sans fil sur le corps [6]. Il existe aussi les nœuds appelés actionneur qui peut administrer des médicaments en fonction des données collectées. Par exemple, dans le cas du diabète, les actionneurs régulent la glycémie en contrôlant les niveaux d'insuline [7].

Dans chaque WBAN, les capteurs sont divisés en deux catégories selon le signal mesuré. Le premier type collecte des signaux continus variant dans le temps qui nécessitent un traitement du signal en temps réel, tels que les capteurs d'électrocardiogramme (ECG) et les accéléromètres. Le deuxième type collecte des signaux discrets variant lentement dans le temps, tels que des capteurs de pression et des capteurs de respiration[8].

I.2.1 Architecture de communication dans les réseaux WBANs

La figure I.1 illustre une architecture WBAN comprenant trois tiers de communications, à savoir; intra-BAN, inter-BAN et au-delà de BAN.

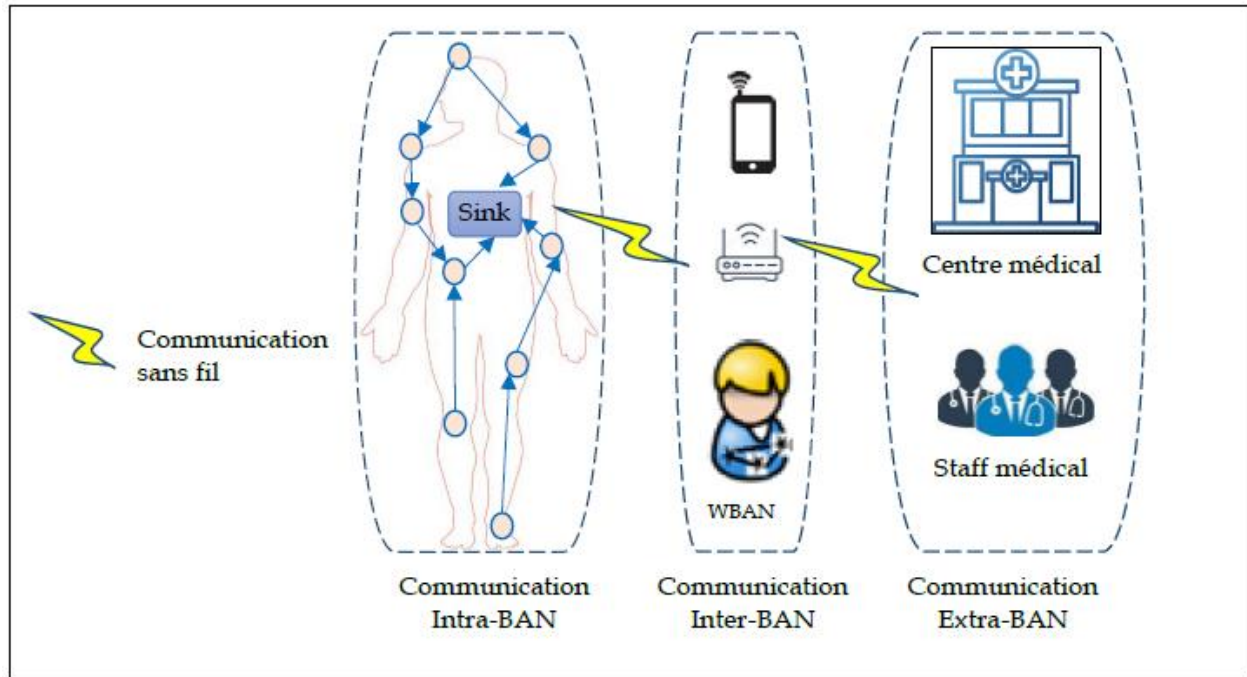


Figure I.1. Architecture à trois niveaux de WBAN

I.2.1.1 Communication Intra-BAN

Cette communication est déroulée autour du corps humain, où les capteurs peuvent mesurer et partager des informations entre eux et également interagir avec le puits. Ce niveau de communication est essentiel car il est directement lié au corps humain, il est caractérisé d'une courte portée et les capteurs sont équipés de petites batteries ce qui le rend très limité en réserve d'énergie [8],[9].

I.2.1.2 Communication Inter-BAN

L'Inter-BAN comprend la communication entre le puits et le point d'accès ou la passerelle chargée de connecter le WBAN au réseau Cloud, à l'aide de technologies sans fil [8].

I.2.1.3 Communication Au-delà de BAN

Dans ce niveau, la communication est entre le point d'accès et le personnel médical localisé par exemple dans un hôpital ou une ambulance et cela via le réseau Internet, un réseau cellulaire ou le réseau Cloud [6],[8]. Cette communication permet au personnel médical d'accéder aux données médicales des patients afin d'intervenir dans les cas d'urgence et de les analyser pour fournir le traitement approprié [6].

I.3 Topologies des réseaux WBANs

Différentes topologies pour les réseaux WBAN peuvent être mises en place en fonction des exigences d'une application donnée et des conditions environnantes. Ces différentes topologies peuvent être utilisées séparément ou en combinaison pour créer des réseaux WBAN adaptés à diverses utilisations dans les domaines du sport, de la santé, de la surveillance environnementale et dans d'autres domaines. En termes de consommation d'énergie, d'évolutivité, de fiabilité et de facilité de déploiement, chaque topologie présente des avantages et des inconvénients. La figure I.2 représente quelques-unes des topologies couramment utilisées dans les réseaux WBAN.

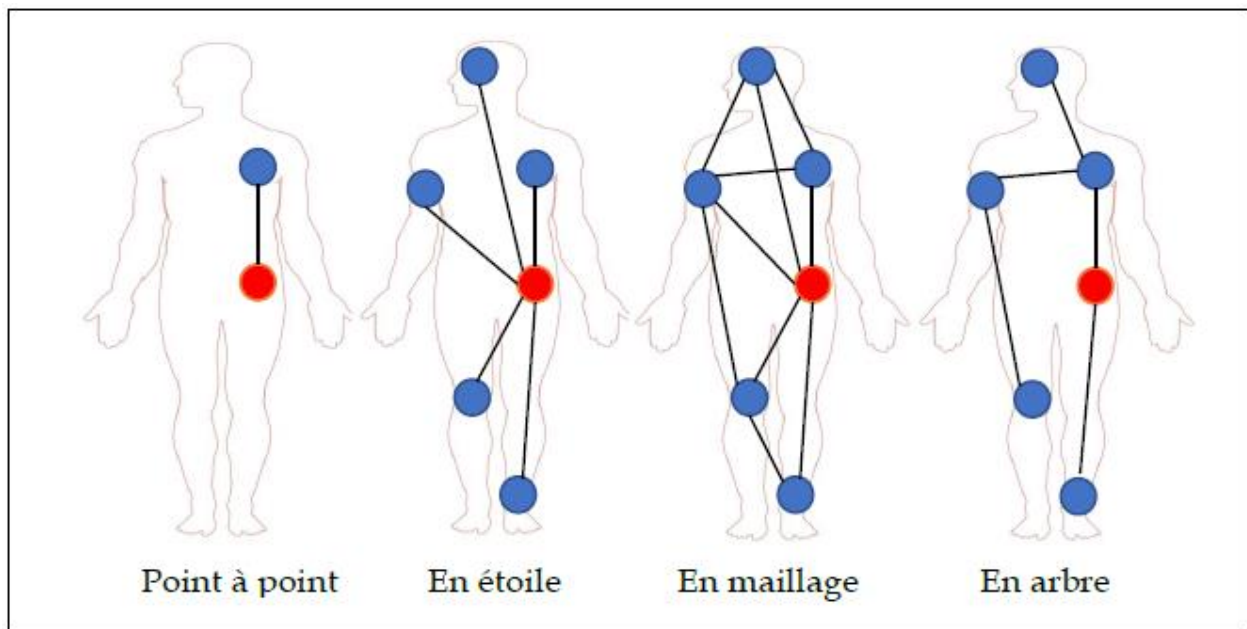


Figure I.2. Topologies des WBANs

I.3.1 Topologie point à point

La topologie point à point est un type de configuration de réseau dans lequel deux nœuds sont directement connectés l'un à l'autre. Il n'y a pas de dispositif de commutation intermédiaire ni de nœud central dans cette conception. Les données sont transmises directement d'un nœud à l'autre sans nécessiter de relais ou de passerelles supplémentaires. En raison de son principal avantage, à savoir que son protocole de connexion n'est pas compliqué, cette topologie garantit une faible latence et un débit élevé. A l'inverse, le principal défaut de cette topologie est sa couverture limitée.

I.3.2 Topologie en étoile

Dans cette configuration, un nœud central agit comme un concentrateur (hub) et les autres nœuds capteurs sont connectés directement à ce concentrateur. Cette topologie est simple à mettre en œuvre et facilite la communication entre les nœuds capteurs et le nœud central. Pour les WBAN, cette topologie est la plus fréquemment suggérée et utilisée. La susceptibilité du nœud central est le principal inconvénient de cette topologie ; en cas d'échec, aucune connexion n'est autorisée.

I.3.3 Topologie en maille

Chaque nœud capteur dans cette topologie est lié à plusieurs autres nœuds capteurs, formant un réseau maillé. Les données peuvent être transmises directement entre les nœuds voisins ou être acheminées à travers plusieurs sauts à travers le réseau. Cette topologie offre une redondance et une fiabilité élevées, même si une gestion efficace de routage est nécessaire à cause du retard causé par les messages transitant via plusieurs nœuds avant d'atteindre leur destination finale.

I.3.4 Topologie en arbre

Elle permet la construction de plusieurs niveaux hiérarchiques de nœuds. Avec un nœud racine central et des nœuds intermédiaires, les nœuds capteurs sont disposés sous forme d'arborescence. Chaque nœud a la capacité d'être parent d'un nœud de niveau inférieur et d'être l'enfant d'un nœud de niveau supérieur. Cette architecture est évolutive et l'isolation et la détection des défauts sont facilitées par sa nature simple. Les nœuds parents ont cependant un taux de consommation d'énergie élevé.

I.4 Les nœuds capteurs

De nombreux appareils hétérogènes, tels que des capteurs, des actionneurs et des appareils personnels, constituent un réseau WBAN. Un aperçu des différents types d'équipements utilisés dans les WBANs et de l'architecture des capteurs sont donnés dans cette partie.

I.4.1 Types d'équipements

I.4.1.1 Un capteur sans fil

Un capteur sans fil est un dispositif électronique compact conçu pour mesurer une valeur physique. Il convertit cette mesure, généralement sous forme électrique, en données binaires interprétables par un système d'information. En ce qui concerne les capteurs médicaux, ils consistent en un capteur doté d'un circuit électronique spécialisé capable de mesurer un ou plusieurs paramètres physiologiques.

I.4.1.2 Un actionneur sans fil

Il s'agit d'un élément électronique crucial des systèmes d'administration de médicaments gérés à distance. Ces dispositifs sont conçus pour administrer des médicaments avec précision, automatiquement et par programme, souvent en réponse à des signaux ou à des commandes à distance provenant de systèmes de surveillance médicale. L'actionneur est une partie active qui peut être utilisée pour administrer un médicament lorsque cela est demandé. Cette activité peut se produire à un moment donné ou en réponse à d'autres influences (un médecin examinant les données, par exemple). Elle peut être même réalisée en temps réel si le capteur révèle un problème.

I.4.1.3 Un appareil personnel sans fil

L'appareil personnel sans fil, désigné souvent comme le "sink", est chargé de recueillir toutes les données provenant des capteurs et des actionneurs, puis de les transmettre par le biais d'une passerelle sans fil vers le centre de commande du réseau WBAN, où elles seront traitées par des professionnels de la santé tels que des médecins ou des infirmières. Dans certaines configurations, un assistant numérique personnel (PDA), un Smartphone, une montre connectée, un bracelet intelligent ou tout autre appareil électronique portable est utilisé à cette fin.

I.4.2 Architecture d'un nœud capteur

Chaque capteur est composé de quatre unités de base: l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de communication et l'unité de contrôle d'énergie [10]. La figure I.3 montre les différents composants d'un capteur.

I.4.2.1 Unité de captage

L'unité de captage ou d'acquisition se compose généralement de deux sous-modules distincts : le capteur proprement dit et un convertisseur analogique-numérique (CAN ou ADC, pour Analog-to-Digital Converter). Le capteur génère des signaux analogiques en fonction du phénomène observé, et il revient à l'ADC de les convertir en signaux numériques utilisables. Ces signaux numériques sont ensuite acheminés vers l'unité de traitement.

I.4.2.2 Unité de traitement

Elle est constituée d'un processeur habituellement couplé à une petite unité de stockage. Son fonctionnement repose sur un système d'exploitation spécifiquement élaboré pour les micro capteurs (comme TinyOS, par exemple) [11]. Cette unité peut effectuer des opérations de filtrage, de compression ou d'analyse locale.

I.4.2.3 Unité de communication

Elle se compose d'un émetteur/récepteur sans fil qui habilite le capteur à échanger des informations avec les divers nœuds du réseau. Cela facilite la collaboration et la transmission d'informations.

I.4.2.4 Unité de contrôle d'énergie

Un capteur est équipé d'une source d'énergie, généralement une batterie, qui assure le fonctionnement du capteur en alimentant les autres composants. En raison de sa petite taille, cette source d'énergie est limitée et souvent non remplaçable. L'énergie représente la ressource la plus cruciale dans un réseau de capteurs, car elle impacte directement la durée de vie des micro-capteurs et, par conséquent, de l'ensemble du réseau.

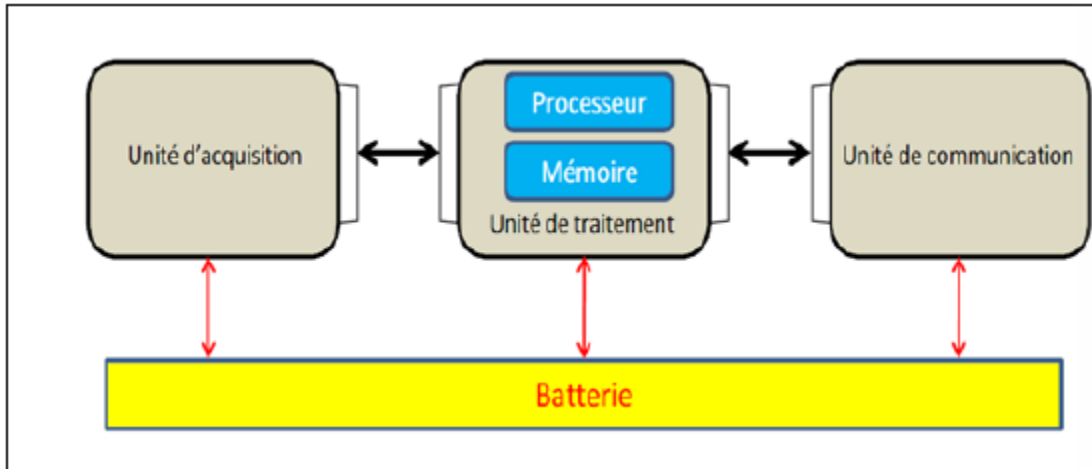


Figure I.3. Architecture d'un nœud capteur

I.4.3 Systèmes d'exploitation pour les nœuds capteur

Les systèmes d'exploitation (OS : Operating System) conçus spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil sont des interfaces informatiques qui permettent aux capteurs de fonctionner au sein des réseaux. Ils doivent être légers, à faible consommation d'énergie et adaptés aux besoins particuliers des réseaux de capteurs. Un système d'exploitation sur un capteur en réseau sert comme interface entre les applications distribuées et les ressources matérielles. Son double objectif est de faciliter la programmation d'applications et de maximiser l'utilisation des ressources. Le choix du système d'exploitation dépend souvent des besoins spécifiques de l'application et des caractéristiques du matériel utilisé. Voici quelques-uns des systèmes d'exploitation couramment utilisés pour les nœuds capteurs :

- Contiki : Contiki est un système d'exploitation open-source conçu pour les systèmes embarqués, y compris les nœuds capteurs. Il est léger, flexible et prend en charge une variété d'architectures matérielles.
- TinyOS : TinyOS est un système d'exploitation open-source spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est connu pour sa faible empreinte mémoire, sa gestion efficace de l'énergie et son architecture modulaire.

- RIOT : RIOT est un système d'exploitation open-source destiné aux objets connectés et aux systèmes embarqués. Il prend en charge diverses plates-formes matérielles et offre des fonctionnalités adaptées aux nœuds capteurs.
- MANTIS OS : MANTIS OS est un système d'exploitation open-source développé spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil. Il se concentre sur la facilité d'utilisation et l'optimisation de l'énergie.
- LiteOS : LiteOS est un système d'exploitation open-source conçu pour les objets connectés, y compris les nœuds capteurs. Il est compact, rapide et adapté aux dispositifs avec des ressources limitées.
- FreeRTOS : FreeRTOS est un système d'exploitation temps réel open-source qui peut être adapté pour les nœuds capteurs. Il est modulaire, portable et offre une gestion efficace des tâches.
- TinyKernel : TinyKernel est un noyau de système d'exploitation minimaliste conçu pour les systèmes embarqués et les nœuds capteurs. Il se concentre sur l'efficacité et la simplicité.
- Nano-RK : Nano-RK est un système d'exploitation en temps réel conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il offre des fonctionnalités temps réel tout en minimisant la consommation d'énergie.

I.4.4 Pile protocolaire

La pile protocolaire d'un réseau Wireless Body Area Network (WBAN) est un ensemble de protocoles de communication organisés en couches qui permettent l'interopérabilité et la transmission efficace des données entre les différents composants du réseau. Elle comprend généralement les couches: physique, liaison de données, réseau, transport et application[12], [13], chacune ayant des protocoles spécifiques qui contribuent à assurer la communication fiable et efficace entre les dispositifs biomédicaux et les systèmes de surveillance dans le cadre des soins de santé.

I.4.4.1 Couche application

Cette couche fournit les services et les interfaces nécessaires aux applications des utilisateurs finaux pour accéder et échanger des données avec les autres nœuds du réseau. Elle peut inclure des protocoles spécifiques aux applications médicales, telles que la télémédecine, la surveillance de la santé, etc.

I.4.4.2 Couche transport

Cette couche assure le transfert fiable des données entre les applications des nœuds du réseau en fournissant un contrôle de flux, une correction d'erreurs et une retransmission des données si nécessaire. Elle peut utiliser le protocole de transport UDP- Like (User Datagram Protocol- Like). Cependant, lors de la communication avec un réseau externe, le réseau de capteur doit posséder une interface TCP- Splitting (Transmission Control Protocol- Splitting) pour vérifier la compatibilité entre ces deux réseaux communicants.

I.4.4.3 Couche réseau

Cette couche est responsable du routage des données à travers le réseau, en déterminant les chemins les plus efficaces pour la transmission des paquets de données entre les nœuds capteurs et le puits. Elle peut inclure des protocoles de routage spécifiques aux réseaux WBAN pour prendre en compte les contraintes de faible consommation d'énergie et de latence.

I.4.4.4 Couche liaison de donnée

Cette couche assure la transmission fiable des données entre les nœuds du réseau en gérant l'accès au canal, la détection et la correction d'erreurs, ainsi que le contrôle de flux. Elle peut inclure des protocoles comme SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks) et EAR (Eavesdrop And Register) [14].

I.4.4.5 Couche physique

Cette couche définit les spécifications matérielles et les caractéristiques physiques de la transmission des données, telles que la modulation, la fréquence radio, la puissance de transmission, etc. Elle inclut également les protocoles de modulation et de codage pour la transmission sans fil.

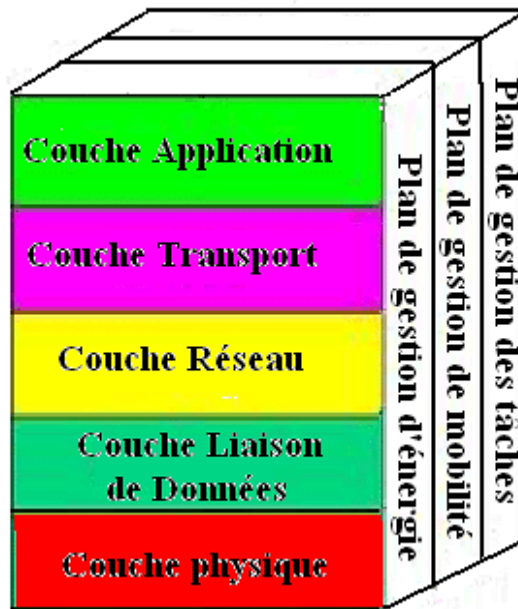


Figure I.4. La pile protocolaire dans un réseau de capteur

I.5 Standards et technologies utilisés dans les réseaux WBANs

Les réseaux WBAN utilisent un certain nombre de technologies sans fil standardisées pour la transmission des données collectées. Le choix de la technologie sans fil devient un problème de conception important des systèmes WBAN, où une technologie inappropriée peut entraîner une perte de temps et d'énergie. Dans cette partie, nous présentons les standards et les technologies proposés pour les WBANs qui sont présentés par la figure I.5 et la figure I.6.

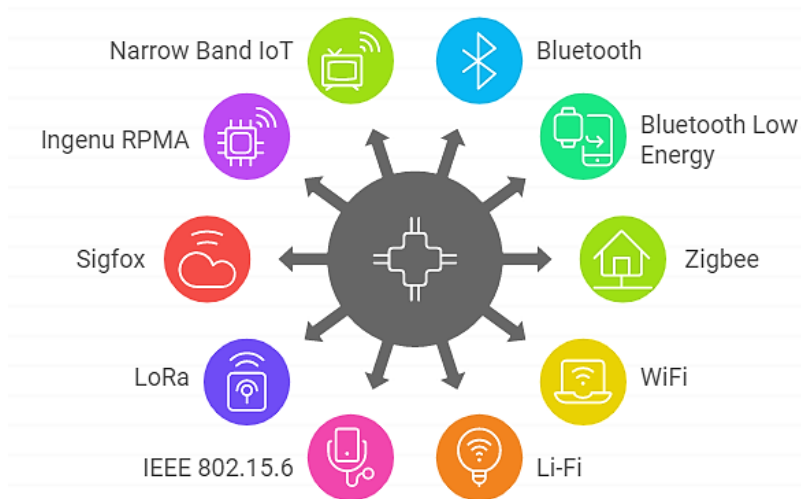


Figure I.5. Standards et technologies de communications dans les WBANs

I.5.1 Les standards IEEE.802

I.5.1.1 Bluetooth

Ce standard a été adopté pour les communications sans fil à courte portée [15], et proposé pour transmettre la voix et les données[16]. Le piconet est un réseau personnel de nombreux appareils Bluetooth. Chaque piconet est composé d'un appareil qui agit comme maître et de sept appareils appelés esclave qui ne peuvent communiquer qu'avec l'appareil maître. Les appareils Bluetooth utilisent la bande ISM 2,4 GHz, qui a une portée de 1 à 100 mètres. Le débit de données maximum est de 3 Mbps, et la configuration de la connexion et le transfert de données prennent environ 100 millisecondes [15]. Bluetooth est couramment utilisé dans les systèmes WBAN pour la communication entre les capteurs et le PD dans la première couche car il est gratuit et pris en charge par la plupart des appareils. Il peut être utilisé pour les capteurs qui nécessitent un débit de données relativement élevé, bien que ce ne soit pas l'option la plus économe en énergie.

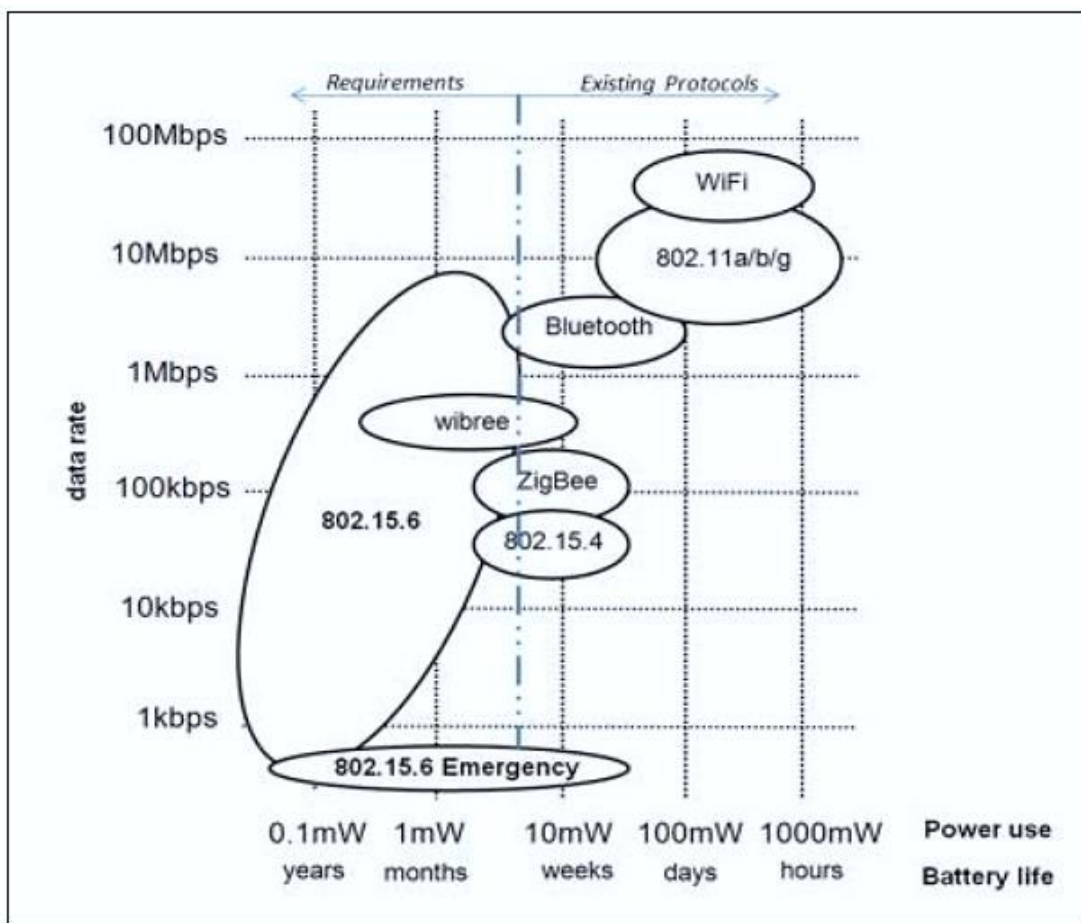


Figure I.6. Caractéristiques des standards IEEE utilisés par les WBANs [17]

I.5.1.2 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) a été créé pour permettre aux petits appareils à faible consommation de se connecter sans fil aux terminaux mobiles. Un appareil BLE peut faire partie de nombreux piconets et peut fonctionner à la fois comme appareil maître et esclave [18], [19]. BLE a un débit de données allant jusqu'à 1 Mbps, ce qui en fait un bon choix pour les applications WBAN. De plus, en raison du faible cycle de service, BLE utilise uniquement 10% de l'énergie utilisée par Bluetooth. Dans les systèmes WBAN, cela prolonge la durée de vie de la batterie du capteur. Par rapport aux secondes Bluetooth, la synchronisation ne prend que quelques millisecondes, ce qui est extrêmement utile pour les appareils à latence critique comme ceux utilisés dans les applications de surveillance de la santé WBAN. Il fonctionne à 2,4 GHz et prend moins de 3 millisecondes pour la configuration de la connexion et le transfert de données. Sa limite principale est la faible portée de communication: 5-10 m [20], [15].

I.5.1.3 Zigbee IEEE 802.15.4

ZigBee est une technologie de réseau sans fil couramment utilisée dans les environnements à faible consommation d'énergie. ZigBee est conçu pour les applications radiofréquences à faible débit de données, à longue durée de vie de la batterie et sécurisées. Les appareils équipés de ZigBee peuvent fonctionner plusieurs années avant de devoir changer leurs piles grâce à son mode veille (sleep) [15]. Il consomme entre la moitié et le tiers de l'énergie consommée par Bluetooth [8]. L'inconvénient de Zigbee pour les applications WBAN est l'interférence dans la bande 2,4 GHz, qui est une bande utilisée par de nombreux systèmes sans fil. Un autre inconvénient de Zigbee est son faible débit de données (250 Kbps), ce qui le rend inadapté aux applications WBAN à grande échelle et en temps réel. Il est difficile à mettre en œuvre dans les hôpitaux ou les cliniques (nombreux patients) en raison du faible débit de données. Il est néanmoins parfait pour un usage personnel [21].

I.5.1.4 WiFi IEEE 802.11

Le protocole de communication WiFi est la technologie sans fil la plus utilisée dans les réseaux WLAN. Le WiFi est intégré dans tous les Smartphones, tablettes et ordinateurs portables. Il est idéal pour les transferts de données volumineux grâce à son réseau sans fil haut débit, qui permet

également les appels vocaux, les visioconférences et le streaming vidéo [15]. Dans les systèmes WBAN, l'utilisation du WiFi n'est pas préférée dans la communication Intra-BAN en raison de sa forte consommation d'énergie. Sur certaines applications médicales WBAN, il est utilisé pour la communication entre le puits et les points d'accès dans le tiers Inter-BAN [21].

I.5.1.5 Li-Fi

Le Li-Fi est l'une des solutions révolutionnaires pour surmonter le problème des interférences et de l'absorption des rayonnements radiofréquences [22]. Il était présenté par Haas lors d'une conférence TED en 2011, il permet la communication de données optiques sans fil à haut débit entre des appareils mobiles et d'autres appareils en réseau grâce à des lumières LED utilisées pour transmettre des données[23]. Grâce à l'utilisation de l'éclairage LED, le Li-Fi offre un débit de données élevé allant jusqu'à 1 Gbps ou même plus à un faible coût et une faible consommation d'énergie. D'un point de vue médical, les LED sont susceptibles d'être utilisées dans les maisons et les hôpitaux, ce qui rend le Li-Fi adapté aux applications médicales WBAN. D'autre part, l'utilisation du Li-Fi est limitée par le besoin d'une source lumineuse. Ce défaut entrave la communication entre les murs et force la communication à être limitée dans sa portée [24].

I.5.1.6 IEEE 802.15.6

La norme IEEE 802.15.6 a été proposée comme une technologie sans fil viable pour les appareils à faible puissance comme les biocapteurs utilisés dans le corps humain [25]. Cette technologie a été créée spécifiquement pour le fonctionnement et le déploiement des WBAN, ce qui en fait une alternative viable pour une variété d'applications médicales et non médicales. La norme IEEE 802.15.6 utilise différentes bandes de fréquences pour la transmission de données, notamment : La bande étroite (narrowband NB) qui comprend les bandes 400, 800, 900 MHz et les bandes 2,3 et 2,4 GHz ; l'Ultra Wideband (UWB) qui utilise la bande 3,1-11,2 GHz ; et la communication du corps humain (HBC) qui utilise les fréquences dans la plage de 10 à 50 MHz [26]. En offrant un débit maximal de 680 Kbps, cette norme peut répondre aux besoins de débit de la plupart des applications WBAN. Cependant, il n'est pas en mesure de répondre aux exigences des nouvelles applications qui exigent des transmissions audio ou vidéo de haute qualité [27].

I.5.2 Les technologies LPWAN

Récemment, les technologies LPWAN (Low Power Wide Area Network) sont de plus en plus reconnues par rapport aux anciennes technologies de communication à courte portée et cellulaires grâce à leur connectivité rentable et leur communication à longue portée et à faible consommation d'énergie.

I.5.2.1 LoRa

L'Alliance LoRa promeut un système de communication sans fil à longue portée appelé LoRa, qui signifie "Long Range". Cette technologie est composée de deux composants principaux, LoRa et le protocole LoRaWAN. LoRa est une technologie sans fil brevetée qui pourrait être utilisée dans les systèmes sans fil tels que les WBANs [28]. Ce système est conçu pour être utilisé dans les appareils alimentés par des batteries à longue durée de vie où la consommation d'énergie est très critique. La plupart des technologies sans fil utilisent la modulation FSK (Frequency Shift Key) pour obtenir une faible puissance. LoRa, d'autre part, utilise la modulation à spectre étalé Chirp (CSS) pour conserver les fonctionnalités de faible puissance tout en élargissant la portée de communication [29], [30]. Cette technologie transmet des données à un débit de 0,3 à 50 kbps sur une portée de transmission d'environ 30 km. Les compteurs intelligents, le suivi des stocks, la surveillance, les applications utilitaires et l'industrie automobile sont tous des exemples d'utilisations de la technologie LoRa [31].

Le protocole LoRaWAN est un protocole de communication sans fil créé par LoRa Alliance pour répondre aux problématiques de communication longue portée dans l'Internet des Objets. En raison de son architecture système basée sur LoRaWAN, il se spécialise dans la communication longue portée, à faible consommation d'énergie et à faible débit. Le protocole et son architecture réseau ont un impact important sur la durée de vie de la batterie du nœud, la capacité du réseau, la qualité de service (QoS), la sécurité et le nombre d'applications que le réseau peut prendre en charge [30]. L'architecture d'un réseau LoRaWAN prend en charge une topologie à deux niveaux et se compose de trois types d'appareils : les appareils finaux, les passerelles et les serveurs de réseau. Étant donné que les terminaux capturent les données et les transfèrent directement aux passerelles en intégrant la couche 1 et 2, cette conception est bénéfique pour le WBAN. Les données sont ensuite envoyées des passerelles aux serveurs du réseau via n'importe quelle infrastructure IP, telle que la 4G ou le WiFi, comme illustré à la figure I.7 [29].

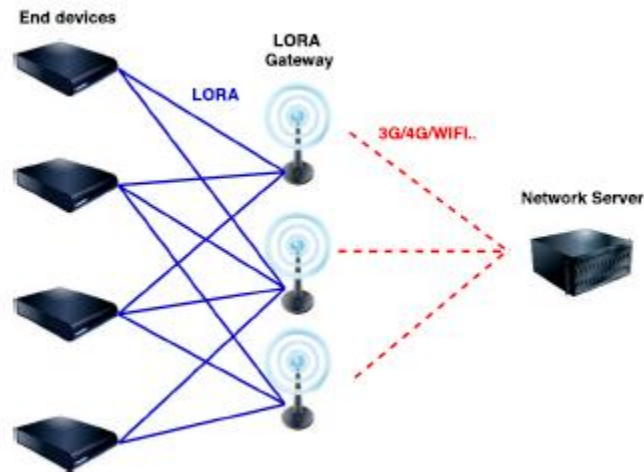


Figure I.7. Architecture LoRa

I.5.2.2 Sigfox

Sigfox est une technologie à basse consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs IoT, y compris les WBANs. Il fait le transfert de petites quantités de données sur des objets intelligents à énergie limitée, en utilisant la modulation à bande passante ultra étroite (UNB) et la bande de fréquences sans licence ISM inférieure à 1 GHz de 915 MHz en Europe et 868 MHz aux États-Unis, à un débit de données extrêmement faible d'environ 100 bps [32]. La communication en visibilité directe permet à la transmission Sigfox de parcourir de longues distances, telles que 30 à 50 km dans les régions rurales. Cette distance peut être améliorée par saut de fréquence. En raison d'obstacles, la portée dans les zones urbaines est réduite à environ 10 kilomètres. Le réseau permet à chaque message d'avoir une charge utile de 12 octets tout en transférant lentement les données en utilisant des méthodes de transmission radio standard telles que la modulation par déplacement de fréquence (GFSK Gaussian Frequency Shift Keying) pour la liaison descendante et la modulation par déplacement de phase (DBPSK Digital Binary PSK) pour la liaison montante [33]. Sigfox présente un certain nombre de limitations, notamment un débit de transmission de données limité, des problèmes d'interférence et une longue latence. En conséquence, malgré sa faible consommation d'énergie et sa portée étendue, diverses modifications du protocole Sigfox sont nécessaires pour s'adapter aux applications médicales WBAN.

I.5.2.3 Ingenu RPMA

Ingenu a breveté la technologie Random Phase Multiple Access (RPMA) en 2010. Ingenu RPMA est une technologie qui a été créée à partir de zéro en utilisant des techniques de modulation avancées dans le but de réduire le coût total de possession tout en étendant la portée d'une station de base et la capacité des liaisons LoRa et Sigfox [34]. Sa portée est limitée par rapport à LoRa et Sigfox, atteignant seulement 4,6 kilomètres dans les zones urbaines. C'est la seule norme LPWAN largement utilisée dans la bande 2,4 GHz sans licence. Cette décision de conception permet d'augmenter la puissance de transmission et le gain d'antenne, mais elle consomme plus d'énergie. Étant donné que la bande ISM 2,4 GHz est fréquemment utilisée par de nombreuses autres technologies, telles que le WiFi et le Bluetooth, les interférences sont plus probables, ce qui peut réduire l'efficacité du RPMA pour les applications médicales dans le WBAN en termes de fiabilité et d'efficacité énergétique [35].

I.5.2.4 Narrow Band IoT

La technologie NB-IoT est une norme 3GPP prometteuse qui a été créée pour réaliser une communication à faible consommation d'énergie afin de prolonger la durée de vie de la batterie des dispositifs de détection (plus de 10 ans), d'améliorer la couverture du signal (en zone rurale, environ 10 km ; en zone urbaine, environ 1 kilomètre) et d'augmenter la flexibilité de déploiement. NB-IoT fonctionne dans les bandes sous licence GSM ou LTE, donc elle peut être déployée rapidement et efficacement en utilisant une grande partie du matériel LTE existant [28], [35]. La technologie NB-IoT peut atteindre un débit de données de 0,3 à 180 kbps dans la liaison montante en utilisant la modulation GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) et/ou SC-FDMA (Signal Carrier FDMA), et un débit de données de 0,5 à 200 kbps dans la liaison descendante en utilisant une technique de modulation OFDMA (Orthogonal FDMA) [33]. Elle peut être utilisée dans diverses applications IoT telles que les WSN, les WBAN, la santé en ligne et les industries émergentes comme les villes intelligentes et l'agriculture intelligente. Comme la technologie NB-IoT a une latence inférieure à 10 secondes, elle ne peut pas être utilisée pour des applications de surveillance émergentes ou continues dans WBAN ; cependant, sa latence élevée la rend plus adaptée aux applications tolérantes aux retards [36].

I.5.2.5 LTE-M

La norme technologique LTE-MTC (Long Term Evolution- Machine Type Communication) à faible puissance étendue annoncée par 3GPP dans la spécification de la version 13, appelée aussi LTE-M dans l'industrie, est une technologie étendue à faible consommation d'énergie qui favorise l'IoT en réduisant la complexité des appareils et en étendant la couverture tout en permettant la réutilisation de la base LTE installée. Elle permet une autonomie de batterie allant jusqu'à 10 ans ou plus dans une large gamme d'applications, tout en réduisant les coûts de modem à 20-25 % des modems EGPRS (Enhanced General Packet Radio Service) conventionnels [37]. De plus, le LTE-M a un débit de données de pointe de 1 Mbps pour la liaison montante et de 384 kbps pour les communications en liaison descendante, avec une latence de 50 à 100 millisecondes. Avec ce débit, LTE-M peut fournir une couverture de communication exceptionnelle d'environ 11 km [15], [38].

I.6 Le problème de consommation d'énergie

La principale contrainte d'un petit nœud de biocapteur réside dans sa source d'alimentation. Étant donné que la seule source d'énergie disponible pour un capteur est une batterie à durée de vie limitée, l'optimisation énergétique devient cruciale, indépendamment de la nature du problème traité. La gestion de la consommation d'énergie demeure une préoccupation majeure, où il devient ardu de prolonger la durée de vie du réseau en raison du faible niveau de puissance et de la capacité limitée des batteries des biocapteurs. C'est particulièrement critique pour les capteurs implantés, qui peuvent nécessiter un fonctionnement sur plusieurs années sans possibilité de remplacement de leurs batteries.

Par conséquent, voici la définition du modèle de consommation d'énergie du nœud capteur [39].

- Energie de détection d'évènement : c'est l'énergie utilisée par un nœud de capteur pour allumer son unité de collecte et d'acquisition de données. La consommation de cette énergie varie en fonction du type de capteur (son, image, température, etc.) et des opérations effectuées sur celui-ci (conversion analogique-numérique, conditionnement du signal, échantillonnage et conversion de signaux physiques en signaux électriques, etc.).
- Energie de traitement de données : c'est l'énergie utilisée par un nœud pour activer son unité de traitement de données, qui comprend des actions telles que la lecture et l'écriture en mémoire.

- Energie de transmetteur radio : c'est l'énergie utilisée par un nœud pour allumer son unité de transmission Par rapport à la dissipation de l'unité de traitement, cette énergie est nettement supérieure. Pottie et Kaiser [40] ont montré que la quantité d'énergie nécessaire pour transmettre une petite quantité de données peut être équivalente à l'exécution de plusieurs milliers d'instructions.

I.6.1 Etat de nœud capteur

Un nœud capteur peut généralement passer par plusieurs états en fonction de son fonctionnement, de la gestion de l'énergie et des tâches spécifiques qu'il accomplit [41]. Ci-dessous ces différents états :

- Etat d'attente : Le nœud capteur est en veille, consommant généralement très peu d'énergie. Il est prêt à accepter des commandes et à passer à un état actif alors qu'il est en attente.
- Etat actif : Le nœud capteur fonctionne normalement et collecte les données des capteurs, traite les données et interagit avec d'autres nœuds.
- État de transmission : Les données sont envoyées du nœud capteur vers d'autres nœuds du réseau. Étant donné que l'émetteur/récepteur sans fil est utilisé, cet état peut nécessiter une consommation d'énergie supplémentaire.
- État de réception : Les données d'autres nœuds du réseau sont reçues par le nœud capteur. L'énergie peut également être utilisée à cet effet, mais souvent moins que pour la transmission.

I.6.2 Optimisation de la consommation d'énergie

De nombreuses approches ont été mises en place pour optimiser la consommation d'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau WBAN. Voici quelques solutions possibles pour optimiser l'énergie dans les réseaux WBAN :

- Gestion efficace de la puissance : Utilisation de techniques de gestion de la puissance pour ajuster dynamiquement la puissance de transmission en fonction des besoins réels de

communication. Cela permet de réduire la consommation d'énergie lorsqu'une communication à longue portée n'est pas nécessaire.

- Techniques de transmission adaptatives : L'ajustement dynamique des paramètres de transmission, tels que la modulation et la vitesse de transmission, en fonction des conditions du canal et des besoins de communication, peut contribuer à réduire la consommation d'énergie.
- Optimisation des protocoles de routage : L'utilisation de protocoles de routage économes en énergie, comme les protocoles basés sur la formation de cluster ou de chaînes dans le but de réduction de distance de transmission.
- Technologies de récupération d'énergie : L'exploration de technologies de récupération d'énergie, telles que la conversion d'énergie cinétique ou thermique en énergie électrique, peut aider à prolonger la durée de vie des dispositifs WBAN.
- Réduction de la taille des trames : La minimisation de la taille des trames de données transmises permet de réduire le temps d'activité radio, ce qui contribue à économiser de l'énergie.

I.7 Le réseau WBAN dans la médecine d'urgence

I.7.1 L'ambulance intelligente

L'ambulance intelligente représente un réseau de dispositifs médicaux connectés, de capteurs sans fils et de dispositifs d'assistance portables portés par les ambulanciers paramédicaux. Elle s'étend également aux dispositifs de santé grand public portés par les patients.

Les instruments de l'ambulance sont connectés à l'hôpital via une liaison de télémédecine et aux dispositifs portables sur les ambulanciers paramédicaux avec des réseaux de communication à courte portée tels que WLAN, Bluetooth ou Zigbee, ou l'ambulance intelligente joue le rôle d'un hub [42].

Une plateforme IoT relie les ambulanciers paramédicaux aux patients et au réseau hospitaliers.



Figure I.8. Architecture d'une ambulance intelligente.

Un système d'ambulance intelligente basé sur différentes technologies TIC comme l'IoT, WBAN, Big Data, Cloud Computing, etc. est l'une des solutions qui sera bénéfique pour les services d'aide médicale urgente (SAMU) et les structures mobiles d'urgence et de réanimation (SMUR), il sera possible de faire un diagnostic, dès le début de l'intervention, dès les premières minutes, qui sont déterminantes pour le patient. La conception de ce système est proposée pour offrir :

- Les soins de santé à distance :

Avec la demande croissante de services de santé, les services de diagnostic traditionnels deviennent insuffisants pour répondre aux besoins.

Les soins de santé à distance peuvent être utilisés pour améliorer la qualité de vie d'un patient en réduisant le fardeau (la charge) du système médical et le coût de la santé publique, grâce à la

réduction des déplacements, le temps de médecin et de laboratoire, et une plus grande tranquillité d'esprit patient.

Beaucoup de systèmes et technologies de santé à distance ont été mises en place, comme la technologie de capteurs et des réseaux personnels à courte distance (PAN) par JOVANOVA[43], les systèmes de surveillance de santé sans fil et à domicile utilisés pour une gestion efficace des dispositifs médicaux par Spinsante et Gambi[44], le projet appelé Mobi Health qui est utilisé pour la surveillance continue du patient en dehors de l'hôpital, etc. [5].

La conception de ce système d'ambulance intelligente permettra un traitement efficace sur les lieux qui aidera à minimiser le risque de développer les complications d'une maladie, à éliminer la nécessité de transporter le patient vers l'hôpital après avoir fourni les secours nécessaires, et à réduire ainsi la demande de personnel hospitalier spécialisé dans les accidents et les urgences.

Elle représente aussi un besoin urgent pour soutenir les opérations de récupération à grande échelle et les évacuations dues aux catastrophes naturelles comme les ouragans, les incendies, etc. afin d'éviter les pandémies des maladies infectieuses [42].

- La récupération des données sur les antécédents médicaux du patient :

L'informatisation des dossiers médicaux des patients est appelée dossier de santé électronique (DES) ou EHR (Electronic Health Records), et est utilisé pour suivre les données des patients numériquement plutôt que de manière traditionnelle avec des notes manuscrites et des rapports dactylographiés dans un système de fichiers papier [5]. Pour récupérer les ressources EPR (Electronic Patient Records) ou EHR dans l'ambulance ou transmettre les données vers l'hôpital, on utilise généralement une communication multi-sauts. La communication de véhicule à véhicule (V2V) permet de transférer des données de la station de base la plus proche vers d'autres véhicules adjacents, comme le montre la figure I.9, rendant la communication de données possible même lorsque l'ambulance se trouve en dehors de la région de couverture cellulaire. Dans ce cas, seul VehicleA se trouve à l'intérieur de la zone de couverture cellulaire. La communication directe V2V à courte portée est utilisée pour transmettre des paquets de données d'un véhicule à l'autre, permettant à l'ambulance de continuer à exploiter sa connexion réseau même lorsqu'elle se trouve en dehors de la zone de couverture cellulaire [42].

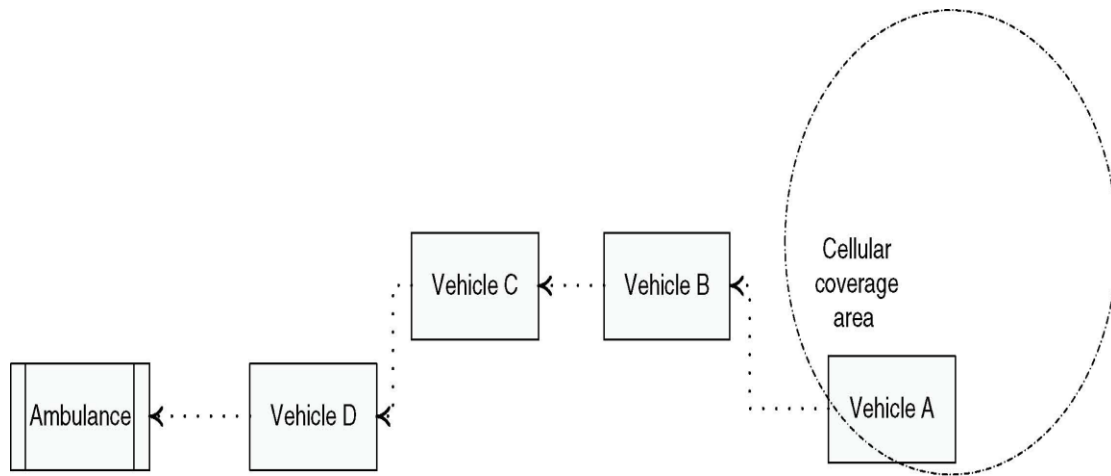


Figure I.9. Extension de portée via un réseau cellulaire multi-sauts

- La télémédecine :

Elle comporte plusieurs domaines comme la visioconférence (téléconsultation), la surveillance à distance d'un patient par des professionnels de santé (télésurveillance) et les demandes d'avis médicaux entre confrères (télé-expertise) [45].

Lorsqu'un ambulancier arrive sur une scène d'urgence, le patient peut présenter plusieurs syndromes. L'ambulancier ne peut pas toujours distinguer le type de maladie exacte. Une acquisition et analyse efficace de données du patient plus une demande d'avis médicale d'un spécialiste sont nécessaires pour un diagnostic rapide et précis et un meilleur traitement.

I.8 Conclusion

Les Wireless Body Area Networks (WBANs) émergent comme une innovation technologique de premier plan, porteuse de promesses quant à sa capacité à transformer fondamentalement la prestation des soins de santé. En permettant une surveillance continue et personnalisée de la santé, les WBANs ouvrent la voie à une nouvelle ère de médecine préventive et proactive, où les individus peuvent bénéficier d'un suivi constant de leur bien-être, détectant ainsi les problèmes de

santé émergents avant qu'ils ne deviennent critiques. De plus, en facilitant la télémédecine, ces réseaux offrent la possibilité d'une consultation médicale à distance, éliminant les barrières géographiques et permettant un accès rapide et efficace aux soins de santé, notamment dans les zones reculées ou mal desservies. Cette accessibilité accrue aux services de santé contribue à améliorer la qualité de vie des patients, en réduisant les délais d'attente pour les consultations médicales, en permettant une intervention médicale précoce et en favorisant une prise en charge proactive de la santé. Cependant, pour réaliser pleinement ce potentiel, il est crucial de relever les défis actuels et d'investir dans la recherche, le développement et l'adoption des WBANs dans les pratiques cliniques quotidiennes.

Chapitre II : le routage dans l'internet des objets

II.1 Introduction

Le routage constitue une composante essentielle dans le fonctionnement des réseaux de l'Internet des Objets (IoT). Il s'agit du processus par lequel les données sont acheminées entre des appareils connectés, souvent hétérogènes et dispersés, afin de garantir une communication fluide et efficace. Les réseaux IoT se distinguent par leur diversité, avec des dispositifs variés tels que capteurs, actionneurs, équipements portables et véhicules autonomes, exigeant des protocoles de routage adaptés à leurs caractéristiques spécifiques.

Dans ce chapitre, nous explorons les concepts fondamentaux du routage dans l'IoT, en commençant par sa définition et ses mécanismes, avant d'aborder les différents types de protocoles de routage et leurs classifications. Enfin, nous mettons en lumière les défis majeurs auxquels ces protocoles doivent répondre, notamment la gestion des ressources limitées, la mobilité des nœuds, la sécurité, et les contraintes liées à la latence.

II.2 Internet des objets

II.2.1 Définition

L'Internet des objets (IoT) se réfère à un réseau d'objets physiques interconnectés, capables de collecter et d'échanger des données via Internet sans intervention humaine. Ce terme a été introduit pour la première fois en 1999 par Kevin Ashton lors d'une présentation pour l'entreprise Procter & Gamble[46]. Il a présenté l'idée de la manière suivante : « Si nous avons des ordinateurs capables de connaître toutes les informations nécessaires, en collectant les données de manière autonome, sans intervention humaine, nous pourrions tout suivre et tout quantifier, ce qui permettrait de réduire considérablement le gaspillage, les pertes et les coûts. Nous serions en mesure de savoir quand un objet doit être remplacé, réparé ou rappelé, et de déterminer s'il est encore en bon état ou périmé. »

Cette technologie a connu une adoption massive dans divers secteurs, notamment la santé, l'industrie, l'agriculture et les villes intelligentes, où elle améliore l'efficacité, réduit les coûts et transforme les modes de vie.

II.2.2 Définition d'un objet

Le dictionnaire Larousse définit un objet comme « toute chose concrète, visible et sensible », tels qu'une personne, un ordinateur, un Smartphone, une voiture, un capteur, une maison intelligente, etc. Ces objets, allant des appareils domestiques aux systèmes industriels et médicaux, et qui sont

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

devenus « des objets connectés » grâce à l'ajout d'une connexion internet, ont apporté une valeur ajoutée en termes de fonctionnalités, d'information et d'interactions avec l'environnement.

Dans le cadre spécifique de l'Internet des objets, peu importe la perspective, cet objet dispose au moins d'un identifiant unique associé à une identité qui exprime à la fois ses caractéristiques immuables (type, couleur, poids, etc.) et son état, c'est-à-dire l'ensemble de ses caractéristiques qui peuvent changer au fil du temps (position, niveau de batterie, etc.). Les objets de l'IoT offrent la possibilité de capturer, c'est-à-dire de convertir une grandeur physique analogique en un signal numérique, de stocker : regrouper des données brutes, générées en temps réel, arrivant de manière imprévue, et de transmettre des données provenant du monde physique [47].

II.3 Architecture de l'IoT

Trois éléments principaux constituent l'architecture de l'IoT : les capteurs et les actionneurs, les passerelles et les réseaux de communication, ainsi que les systèmes de stockage et de traitement des données.

II.3.1 Capteurs et actionneurs

Les capteurs sont des appareils capables de recueillir des données de l'environnement physique et de les transformer en données numériques. Les actionneurs, eux, servent à réaliser des mouvements physiques en réponse à des instructions reçues (administration d'un médicament, réglage de la température d'un appareil).

II.3.2 Passerelles et réseaux

Ces éléments permettent de transmettre les données des capteurs vers les systèmes informatiques via des technologies sans fil. Les passerelles agissent comme des points de communication entre les dispositifs IoT et les serveurs ou centres de traitement des données.

II.3.3 Stockage et traitement des données

Les dispositifs IoT stockent habituellement les données collectées dans le cloud, où elles peuvent être analysées en temps réel grâce à des algorithmes sophistiqués. Grâce à cette capacité de traitement de données volumineuses, il est possible d'effectuer des analyses prédictives et de fournir des réponses automatiques dans des systèmes intelligents.

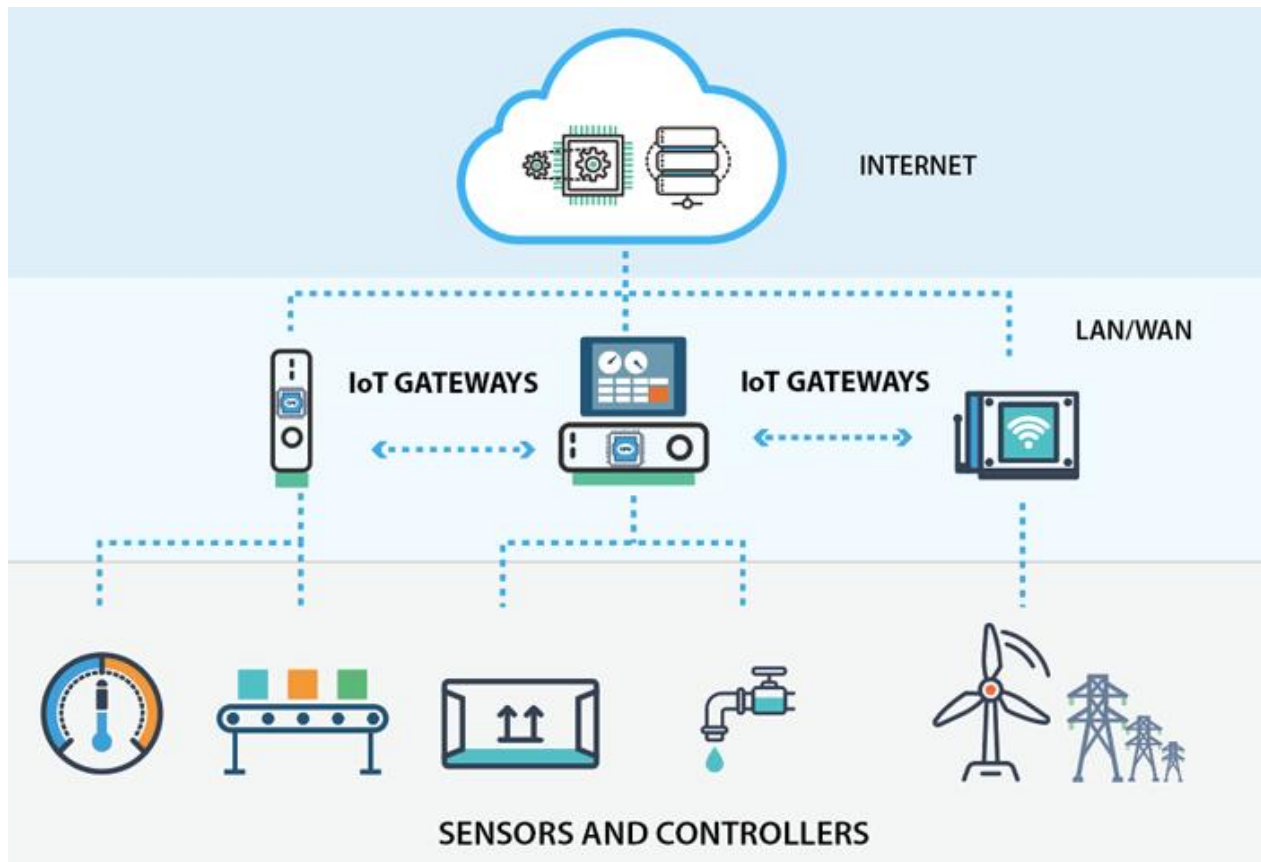


Figure II.1. Architecture IoT

II.4 Le Cloud computing

II.4.1 Définition

La notion de Cloud computing a été liée et soutenue par le sujet de l'Internet des objets, en particulier l'Internet mobile. C'est une structure dans laquelle le stockage et le traitement des données se déroulent en dehors de l'appareil mobile. Par conséquent, les dispositifs mobiles ne nécessitent pas une configuration puissante car tous les modules de gestion complexes peuvent être traités dans le cloud.

Un des résultats les plus significatifs de l'Internet des objets est la quantité considérable de données produites par des appareils connectés à Internet. Plusieurs applications IoT nécessitent une quantité importante de stockage de données, une vitesse de traitement élevée afin de faciliter la prise de décision en temps réel, ainsi que des réseaux à haut débit pour la transmission de données, d'audio ou de vidéo. Le Cloud computing offre une solution parfaite pour gérer de

grandes quantités de données et les traiter en temps réel pour un grand nombre d'individus et d'appareils IoT [47].

Cette technologie permet aux utilisateurs d'accéder, via Internet, à des infrastructures matérielles ou logicielles, tout en déployant des applications sans contrainte géographique. Elle se distingue par des coûts attractifs et une qualité de service optimisée. Dans le domaine du Cloud Computing, les services sont délivrés de manière dynamique grâce à des centres de données (Data Centers) hébergeant des machines virtuelles interconnectées. L'évolutivité et l'élasticité du Cloud Computing reposent sur la capacité de l'utilisateur à ajuster les ressources nécessaires, que ce soit à la hausse ou à la baisse, de façon très flexible, avec une facturation basée sur l'utilisation réelle des ressources [48].

II.4.2 Architecture du Cloud Computing

Pour stocker des données dans le cloud, de nombreuses organisations adoptent des systèmes de cloud computing, leur permettant d'accéder à leurs systèmes à tout moment. L'architecture du cloud computing est généralement divisée en deux parties principales : le Front-End et le Back-End, qui sont interconnectés via Internet.

Le Back-End est chargé d'assurer la sécurité des informations pour les utilisateurs du cloud. Cette partie, gérée par les fournisseurs de services, englobe toutes les ressources nécessaires pour offrir les services. Elle intègre des mécanismes de sécurité, une grande capacité de stockage, des serveurs, des machines virtuelles, des outils de contrôle du trafic, ainsi que des modèles de déploiement, entre autres [49].

En revanche, les utilisateurs interagissent avec le Front-End, qui inclut les interfaces et applications nécessaires pour accéder aux services cloud. Cette partie comprend des appareils comme les tablettes, les serveurs web et les dispositifs mobiles.

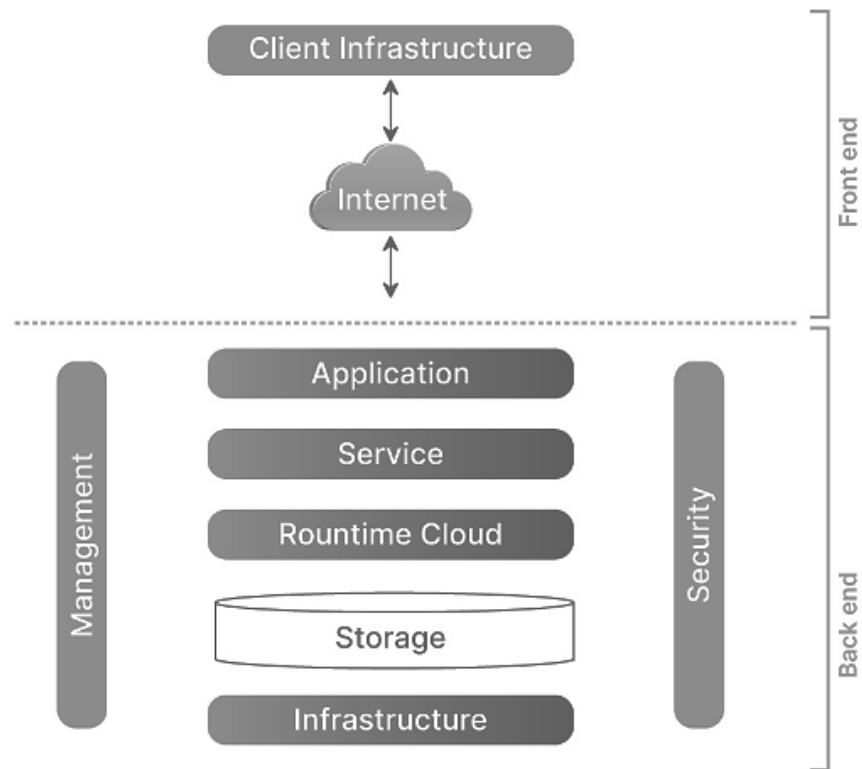


Figure II.2. Architecture du Cloud Computing

Étant donné que le cloud héberge une grande variété de données appartenant à des utilisateurs différents, les systèmes d'accès au cloud diffèrent des solutions de stockage classiques. La plupart des fournisseurs mettent en œuvre des systèmes d'accès multiples pour répondre aux besoins des utilisateurs.

Certains éléments de l'architecture du cloud computing peuvent être décrits comme suit :

- **Infrastructure client** : Considérée comme un élément du Front-End, elle fournit une interface utilisateur graphique (GUI) permettant à l'utilisateur d'interagir avec le cloud.
- **Internet** : Constitue le médium permettant la communication entre le Front-End et le Back-End.
- **Application** : Désigne toute plateforme ou logiciel auquel l'utilisateur souhaite accéder via le cloud.
- **Service** : Propose trois types de services principaux : SaaS, PaaS et IaaS.

- **Cloud Runtime** : Fournit un environnement d'exécution et de fonctionnement pour les machines virtuelles.
- **Stockage** : Élément essentiel de l'architecture cloud, il offre une grande capacité pour stocker et gérer les données dans le cloud.
- **Infrastructure** : Fournit des services aux niveaux applicatifs, hôte et réseau, en combinant des éléments matériels et logiciels.
- **Gestion** : Assure la coordination et la gestion des éléments du Back-End, tels que les applications, services, environnement d'exécution, stockage, infrastructure et aspects liés à la sécurité.
- **Sécurité** : Implémente les systèmes de sécurité nécessaires au sein du Back-End.

II.4.3 Les formes de services

Le cloud computing est une approche axée sur les prestations. En termes conceptuels, les services proposés par le Cloud Computing peuvent être classés en trois catégories selon le degré d'abstraction [50].

II.4.3.1 Le service IAAS (Infrastructure As A Service)

IaaS offre des ressources informatiques virtualisées telles que des serveurs, des réseaux et du stockage via Internet, permettant aux utilisateurs de gérer leurs systèmes d'exploitation et applications. Ce modèle se distingue par sa flexibilité, son évolutivité, et son modèle de tarification "pay-as-you-use". Il est particulièrement adapté pour l'hébergement de sites web, les environnements de test, ou la gestion des sauvegardes. Parmi les exemples, on trouve Amazon EC2 et Microsoft Azure Virtual Machines.

II.4.3.2 Le service PAAS (Plateforme As Service)

PaaS fournit une plateforme complète pour développer, tester et déployer des applications, en simplifiant la gestion des infrastructures sous-jacentes. Il inclut des environnements intégrés, des outils collaboratifs et une gestion automatisée de la sécurité et de l'évolutivité. Ce modèle est idéal pour le développement d'applications web ou mobiles et les analyses de données. Des exemples de plateformes incluent Google App Engine et netsuit.

II.4.3.3 Le service SAAS (Software As Service)

SaaS propose des applications prêtes à l'emploi accessibles via Internet, sans nécessiter de gestion technique de la part de l'utilisateur. Facile d'accès, ce modèle offre une facturation flexible et est adapté aux outils de productivité, aux solutions CRM, et aux applications collaboratives. Google Workspace et Salesforce sont des exemples typiques de SaaS (figure II.3).

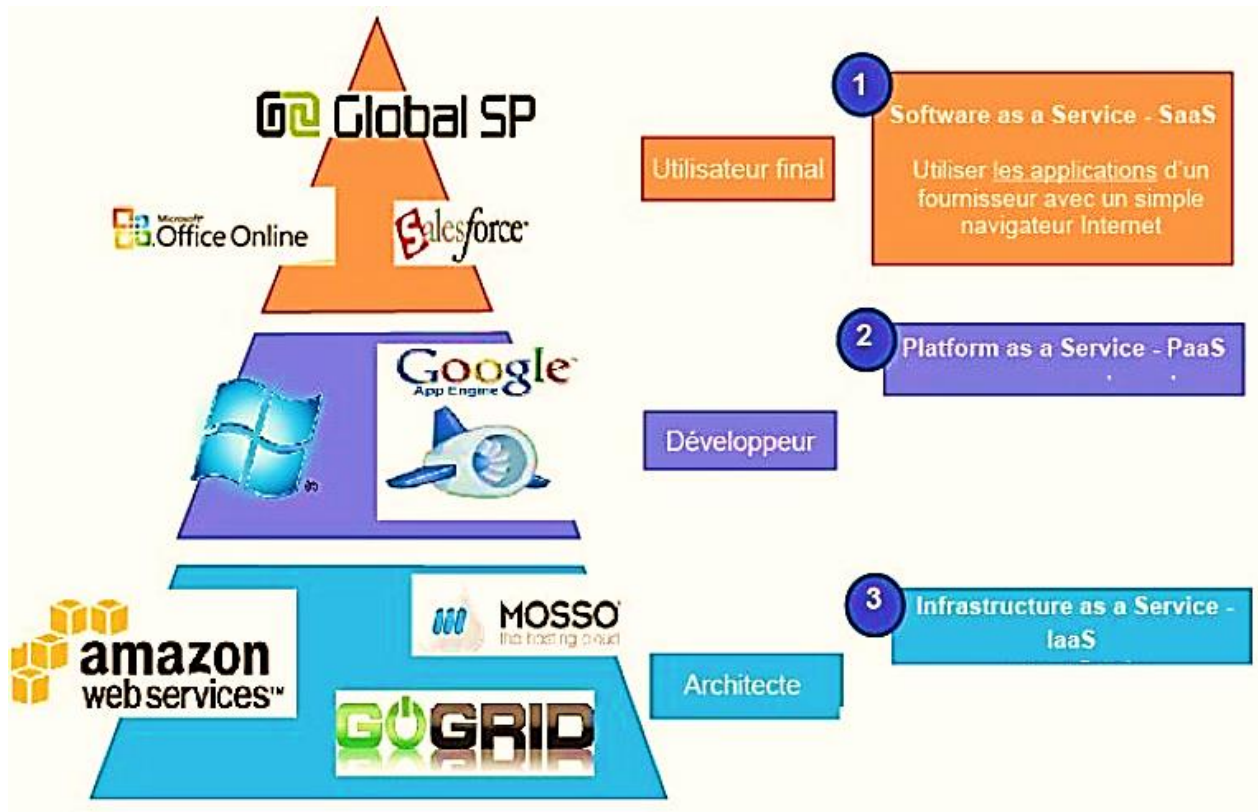


Figure II.3. Les principaux fournisseurs d'IAAS, PAAS et SAAS [50]

II.5 Fog Computing

II.5.1 Définition

Le Fog Computing, ou Fog Networking, est un paradigme d'informatique distribué à grande échelle, conçu pour compléter le Cloud Computing en introduisant des capacités de traitement, de stockage et de communication au niveau des nœuds intermédiaires situés entre les serveurs cloud centraux et les utilisateurs finaux. Cette architecture hiérarchique vise à réduire la latence, à optimiser l'utilisation de la bande passante et à offrir des services plus réactifs en rapprochant les ressources informatiques de la source des données [51].

Contrairement au Cloud Computing, où les données sont majoritairement traitées dans des centres de données centralisés, le Fog Computing traite les informations localement, près des périphériques connectés ou à la périphérie du réseau. Cela permet d'améliorer les performances pour des applications critiques en temps réel, telles que les systèmes IoT, les véhicules autonomes, ou les dispositifs médicaux.

En intégrant les capacités des serveurs cloud avec celles des nœuds intermédiaires, le Fog Computing fournit une solution flexible et décentralisée, adaptée aux environnements nécessitant un traitement rapide et efficace des données tout en conservant l'accès aux puissants services cloud.

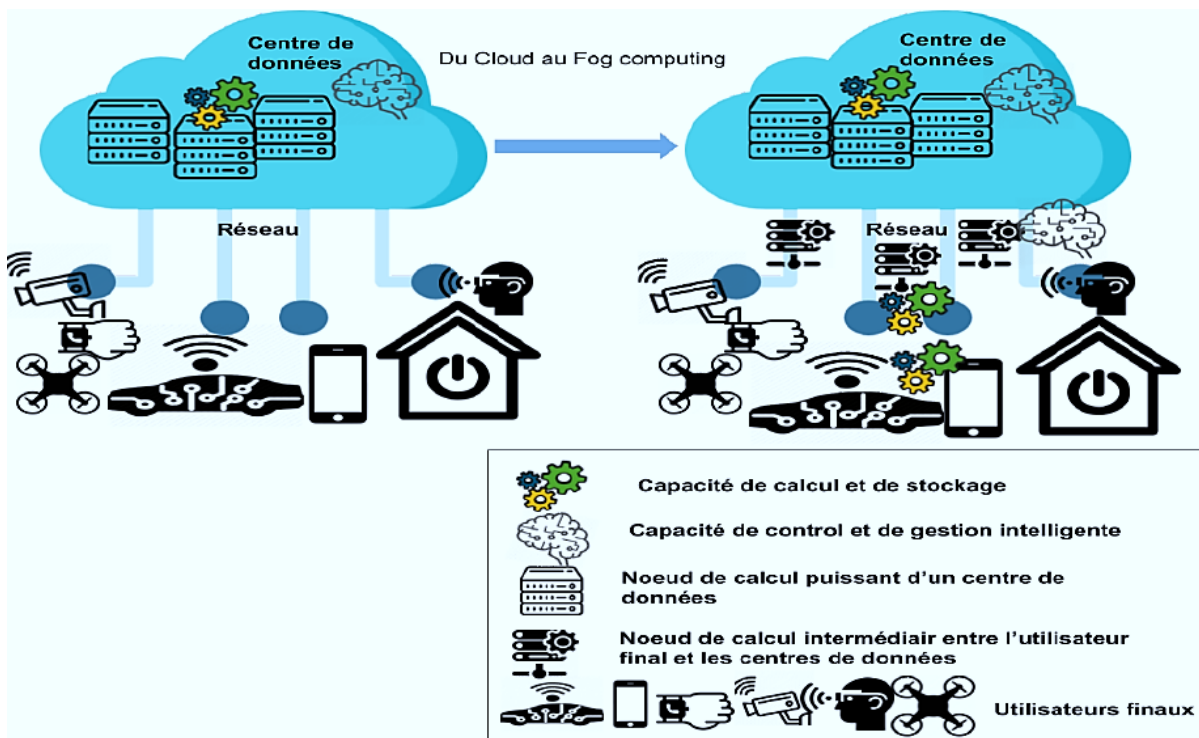


Figure II.4. Illustration de l'évolution de l'architecture Cloud vers le Fog[51]

II.5.2 Architecture et éléments d'une infrastructure Fog Computing

Les nœuds Fog dans une infrastructure de Fog Computing sont des équipements capables de traiter, stocker et transmettre des données. Ils peuvent être physiques (comme des passerelles, des microcontrôleurs ou des ordinateurs personnels) ou virtuels (machines virtuelles ou conteneurs), voire des micro-centres de données combinant ces deux types. Ces nœuds sont hétérogènes en termes de consommation énergétique, de capacités de calcul et de technologies de communication, et certains possèdent également des fonctionnalités réseau pour relier d'autres équipements tout en exécutant des services.

Le déploiement des nœuds Fog, selon le NIST (National Institute of Standards and Technology), peut-être de quatre types :

- **Privé** : utilisé exclusivement par une organisation spécifique.
- **Communautaire** : partagé par une communauté ayant des besoins communs.
- **Public** : accessible au grand public.
- **Hybride** : combinaison de plusieurs types, offrant la portabilité des données et des applications.

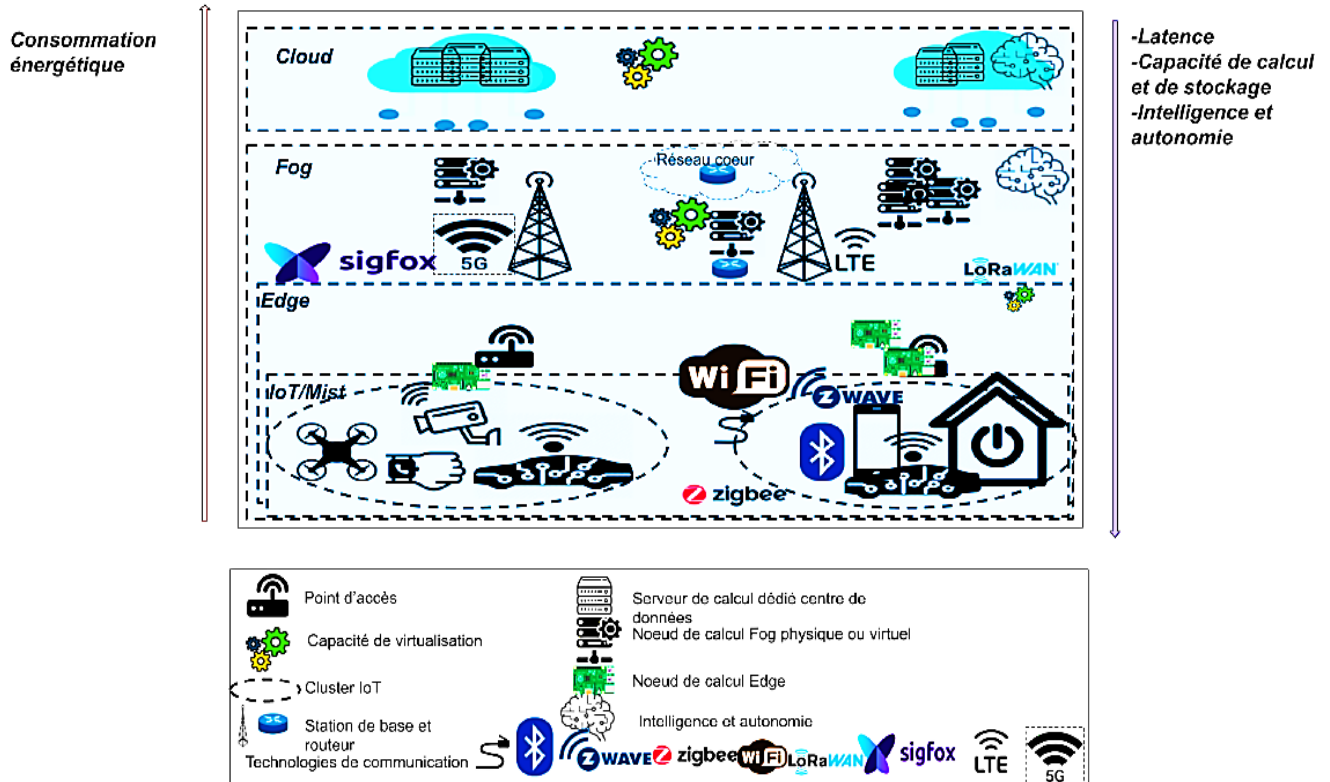


Figure II.5. Vue globale de l'architecture hiérarchique 3 tiers du Fog Computing[51].

II.5.3 La communication dans une infrastructure Fog Computing

Elle repose sur une infrastructure dynamique qui exploite des technologies de communication existantes, majoritairement sans fil, incluant des systèmes avec ou sans infrastructure (mobile, Peer-to-Peer, etc.), ainsi que des réseaux spécifiques comme les WSN ou ceux dédiés à l'Internet des Objets.

II.6 Définition du routage dans l'IoT

Le routage dans l'IoT implique la recherche du meilleur moyen de transmission des données entre les appareils connectés. Les dispositifs IoT, tels que les capteurs, les actionneurs, les dispositifs portables, les voitures autonomes et bien d'autres encore, échangent des données à travers des réseaux de communication. La gestion de ces flux de données repose sur le routage, qui assure une livraison efficace des informations au destinataire désiré.

Les réseaux IoT, avec leurs nœuds dispersés et hétérogènes, nécessitent des protocoles de routage spécifiquement conçus pour répondre à leurs exigences. Il est essentiel que ces protocoles soient en mesure de gérer les limitations de ressources des appareils IoT, leur potentielle mobilité, les interruptions fréquentes du réseau et les exigences en matière de sécurité.

Le protocole de routage doit identifier de manière dynamique les routes vers les destinations, choisir la route la plus appropriée, repérer les routes qui ne sont plus valides et les supprimer, puis ajouter de nouvelles routes, ou mettre à jour les routes en question. On peut classer ce mécanisme en fonction de son fonctionnement en plusieurs catégories, comme mentionné dans la section suivante[52].

II.7 Types de protocoles de routage

Le routage dans les réseaux est classé en fonction de la disposition des nœuds, des nœuds du voisinage et de la transmission de l'information. Les différents protocoles de routage pour les réseaux IoT peuvent être classés selon plusieurs critères. Dans cette partie, nous exposons les diverses catégories de protocoles[53].

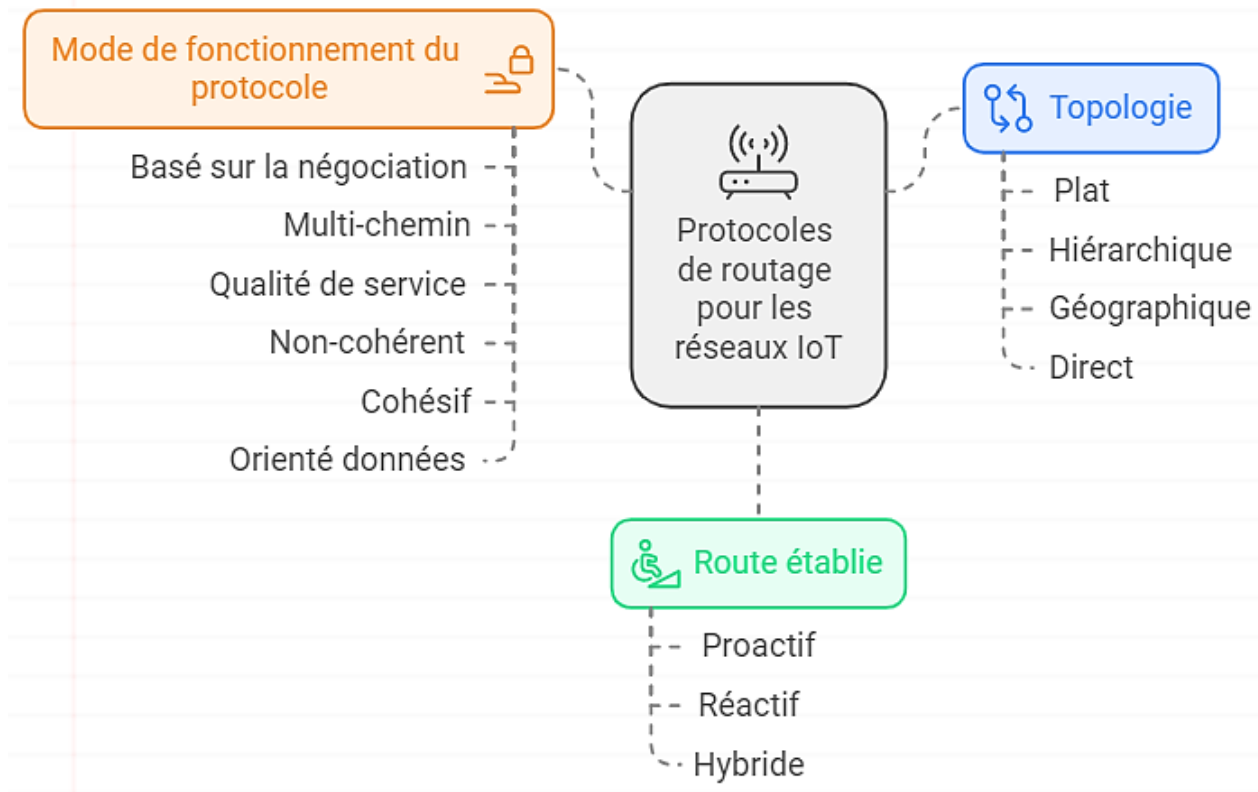


Figure II.6. Type de protocoles de routage dans l'IoT

II.7.1 Basé sur la topologie du réseau

Le routage basé sur la topologie utilise des informations sur les connexions entre les nœuds, qui sont stockées dans des tables spécialement conçues pour le routage. Ces protocoles sont élaborés dans le but d'utiliser une compréhension précise de la structure du réseau pour transmettre les données de façon efficace.

II.7.1.1 Plat

Les objets sont équivalents, partageant les mêmes rôles et fonctionnalités. Tout objet peut communiquer avec n'importe quel autre objet. L'un des principaux avantages est la simplicité, car les communications peuvent être établies sans coûts supplémentaires (seules des informations des voisins directs sont requises). De plus, les connexions se forment dynamiquement sans besoin de synchronisation, les itinéraires étant créés uniquement dans les zones où les données doivent être transmises.

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

S'il existe un point central (station de base), tout le trafic dirigé vers lui passera inévitablement par les objets à proximité. Cette forte densité de communications peut entraîner une congestion au point central et dans ses objets adjacents. Par conséquent, cette surcharge peut entraîner une consommation d'énergie accrue et une latence plus élevée.

II.7.1.2 Hiérarchique

Les transmissions se produisent à au moins deux niveaux. Le système utilise une approche de clustering. Les données des objets de cluster sont agrégées par le chef de cluster avant d'être envoyées à la destination finale.

Les avantages de la formation de clusters et de la sélection de chefs de cluster incluent l'optimisation de la consommation d'énergie, l'amélioration de la durée de vie globale du système et l'amélioration de l'évolutivité.

Cependant, il y a des inconvénients : une synchronisation locale et globale est requise pour établir des connexions, la formation de clusters peut entraîner une augmentation de la surcharge, et le processus d'élection des chefs de cluster devient plus gourmand en ressources à mesure que la taille du réseau augmente.

II.7.1.3 Géographique

Le routage s'appuie sur des informations de localisation géographique pour calculer les distances entre les objets et évaluer l'énergie nécessaire à la transmission des données. Il offre plusieurs avantages par rapport aux autres types de routage : les coûts de mémoire sont relativement faibles, les coûts de contrôle sont minimisés, l'évolutivité est améliorée, la localité est améliorée, l'adressage est simple, le routage est optimisé et l'intégration au réseau est simple.

Cependant, un mécanisme de localisation est essentiel pour ce type de routage, ce qui peut augmenter les coûts de traitement. De plus, il existe un risque de rencontrer des nœuds bloqués et de connaître une progression négative.

II.7.1.4 Direct

La station de base est accessible en une seule étape depuis chaque objet, permettant une transmission directe des données entre l'objet et la station de base. Ce type d'architecture, bien que peu commun, est employé dans certaines applications spécifiques.

II.7.2 Basé sur l'itinéraire établi entre la source et la destination

Ce type de routage est basé sur le type d'itinéraire permettant de déterminer et de maintenir le chemin optimal pour transmettre des données depuis un nœud source vers un nœud de destination.

II.7.2.1 Proactif

Également appelés protocoles orientés table (table-driven), ils maintiennent en permanence des chemins de routage prêts à être utilisés, indépendamment du trafic ou des demandes des nœuds du réseau. Pour ce faire, ils mettent continuellement à jour les tables de routage en fonction des changements dans la topologie du réseau. Le principal avantage est de gagner du temps lors de la demande d'un itinéraire, car il est déjà configuré et qu'il n'y a pas de délai de réaction. Le routage de ce genre est adapté aux réseaux denses, de taille moyenne et à mobilité élevée. Toutefois, cela entraîne un coût supplémentaire en termes de mémoire, puisqu'il faut stocker les itinéraires. En outre, il y a une possibilité de calculer et de tracer des itinéraires superflus si aucune transmission n'est requise. De cette manière, l'actualisation des tables de routage et l'échange des messages de contrôle requis peuvent conduire à un gaspillage des ressources réseau, en raison des itinéraires déjà établis mais inutilisés. Cela peut restreindre les échanges du réseau et provoquer une consommation énergétique significative.

II.7.2.2 Réactif

Ou protocoles à la demande (on-demand), ils construisent les chemins de routage uniquement lorsque cela est nécessaire, en réponse à une demande de communication entre les nœuds. À la différence des protocoles proactifs, il n'existe pas de voies établies et hors service. Ainsi, le réseau ne reçoit aucun message de contrôle sans utilisation, ce qui évite de gaspiller les ressources du réseau. Il convient aux réseaux de grande envergure. D'un autre côté, une forte demande de routes pour des transmissions simultanées peut provoquer des retards considérables avant la construction du chemin. Cela permet de dépasser les échéances prévues et peut provoquer une interruption de la connexion. Ce genre de routage ne convient pas aux réseaux à mobilité élevée.

II.7.2.3 Hybride

Il s'agit d'une combinaison de routage réactif et proactif. Le protocole hybride allie les bénéfices de deux types de routage : le routage proactif et le routage réactif. Il repose sur l'idée de division

du réseau. Effectivement, le routage proactif est employé dans les zones voisines. On utilise le routage réactif pour les autres zones. Le protocole hybride permet de diminuer la consommation d'énergie. D'autre part, il regroupe les désavantages des deux types de routage : proactif et réactif. Ce genre de routage convient aux réseaux de grande envergure.

II.7.3 Basé sur le mode de fonctionnement de protocole

II.7.3.1 Basé sur la négociation

Les données sont transmises avant l'échange de messages de négociation contenant des descriptions de données. Cela évite la transmission de données de manière répétée.

L'avantage de ce type de routage est d'éviter l'envoi de données redondantes. Mais cela peut entraîner une congestion du réseau et un gaspillage de ressources en échangeant des messages de négociation.

II.7.3.2 Multi-path

Différentes voies sont tracées vers les destinations. Par la suite, en cas d'échec du chemin principal, il est possible de trouver et d'utiliser un autre chemin.

Ces caractéristiques présentent des bénéfices tels que l'amélioration de la résistance et des performances du réseau, ce qui contribue à garantir l'équilibrage des charges. D'autre part, une charge de mémoire supplémentaire est requise pour conserver les chemins tracés. En outre, l'actualisation des tables de routage et la création de différentes voies peuvent entraîner une perte de ressources réseau.

II.7.3.3 Basé sur la qualité de service

Ce type de protocoles offre la possibilité de chercher à répondre à certaines exigences de qualité de service (temps de transmission, débit, taux de livraison des paquets, niveau de fiabilité, etc.).

Il est nécessaire de trouver un équilibre entre la qualité de service et la consommation d'énergie pour ce type de routage. Il est employé dans des applications spécifiques (applications de surveillance, réseaux multimédia, applications sensibles au temps, applications sensibles à la sécurité, détection d'intrusion, etc.). La qualité des communications garantit la fiabilité des transmissions.

II.7.3.4 Non-cohérent

Avant de transmettre les données, les objets connectés effectuent un traitement local pour prétraiter et filtrer les informations. Par la suite, ces données sont envoyées à d'autres objets, appelés agrégateurs, où elles subissent un traitement complémentaire, souvent plus complexe. Cette approche permet de réduire la charge de travail des objets agrégateurs, optimisant ainsi leur performance pour gérer des tâches critiques ou intensives. Cependant, cette méthode présente un inconvénient majeur : elle accroît la consommation d'énergie des objets connectés, ce qui peut être problématique dans des environnements où l'autonomie énergétique est limitée.

II.7.3.5 Cohérent

Les objets connectés effectuent un traitement minimal des données localement avant leur transmission, comme la suppression des doublons, l'enregistrement de l'heure ou l'ajout de la date. Une fois ce prétraitement réalisé, les données sont transmises à des objets spécifiques, appelés agrégateurs, qui prennent en charge un traitement plus avancé. Ce mode de routage se distingue par son efficacité énergétique globale, en réduisant la consommation des nœuds périphériques. Cependant, cette approche présente un inconvénient notable : en augmentant la charge de travail des agrégateurs, elle peut compromettre leur durée de vie et leur fiabilité à long terme, particulièrement dans des réseaux où les ressources des agrégateurs sont limitées.

II.7.3.6 Orienté données

Ce type de routage est basé sur des requêtes. Effectivement, lorsque quelqu'un a besoin de données, il demande aux autres objets en diffusant des demandes qui reflètent ses intérêts dans le réseau. Ensuite, il attend les réactions. Les données nécessaires doivent être transmises par les objets qui les possèdent par le chemin inverse de la requête. Il est possible de produire de nombreuses copies des informations demandées en diffusant la demande au voisinage.

Il est essentiel de mettre en place des dispositifs afin de remédier à la surconsommation d'énergie. En outre, il est essentiel que les demandes décrivent les informations requises. Autrement dit, pour les caractériser, il faut établir un système de noms et d'attributs.

II.7.4 Basé sur la diffusion

Le routage basé sur la diffusion repose sur un mécanisme simple où les messages sont propagés de proche en proche à travers le réseau[52]. Ce type de protocole est intuitif et facile à mettre en

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

œuvre, ce qui en fait une solution populaire pour certaines applications IoT. Cependant, il présente des limitations importantes, notamment l'incapacité à gérer efficacement le problème de la "tempête de diffusion" (broadcast storm), qui peut survenir en raison de la redondance et de la divergence des messages dans le réseau.

Les messages envoyés par un nœud sont reçus et retransmis par tous les nœuds voisins, créant ainsi une propagation en cascade à travers le réseau. Ils ne sont pas spécifiquement adressés à un nœud unique ; au lieu de cela, ils atteignent tous les nœuds accessibles, même si ceux-ci ne sont pas les destinataires finaux. Contrairement à d'autres méthodes de routage, la diffusion n'utilise pas de tables de routage ni de processus de découverte de chemin, rendant son mécanisme simple mais non optimisé.

Le routage basé sur la diffusion est couramment utilisé dans des scénarios nécessitant une couverture réseau complète. Par exemple, dans les réseaux de capteurs environnementaux, il permet de diffuser rapidement des alertes sur des événements critiques, comme des incendies de forêt ou des inondations. Dans les réseaux d'urgence, il peut propager des messages d'avertissement à tous les dispositifs connectés pour assurer une réponse rapide. Enfin, cette méthode est utilisée dans les réseaux IoT industriels, notamment pour la synchronisation ou la mise à jour des configurations, bien que des mécanismes de diffusion contrôlée soient souvent adoptés pour atténuer ses limitations.

II.7.5 Basé sur l'optimisation par des algorithmes heuristiques

Dans le domaine médical, l'utilisation des algorithmes heuristiques pour le routage joue un rôle crucial, notamment dans les réseaux IoT appliqués aux soins de santé. Les systèmes médicaux connectés, tels que les Wireless Body Area Networks (WBANs), les dispositifs de surveillance à distance et les infrastructures hospitalières intelligentes, nécessitent des protocoles de routage efficaces pour répondre aux exigences spécifiques de performance et de fiabilité. Ce type de routage garantit un délai de transmission minimal pour les données sensibles, comme les alertes en cas de crise cardiaque ou d'arrêt respiratoire et optimise l'utilisation des ressources réseau pour éviter les pertes ou retards de données, qui pourraient compromettre les décisions médicales.

Les algorithmes heuristiques sont essentiels pour optimiser le routage dans des environnements IoT complexes. Dans les villes intelligentes, ils permettent d'équilibrer les contraintes entre

différents systèmes, tels que les feux de circulation intelligents, les réseaux de capteurs environnementaux et les infrastructures de transport. Dans les réseaux de santé connectés, ces algorithmes assurent un routage efficace des données vitales tout en minimisant l'épuisement des capteurs. De plus, dans les réseaux industriels IoT, ils optimisent la gestion des flux de données critiques pour la maintenance prédictive et les processus automatisés[52].

II.8 Protocoles de routage de la couche réseau

Cette section décrit certains des protocoles standard et non standard [54] utilisés pour le routage dans les applications IoT.

II.8.1 RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks)

RPL [55] est un protocole de routage à vecteur de distance conçu pour les réseaux LLN (Low-power and Lossy Networks) utilisant IPv6. Il établit une topologie basée sur un graphe acyclique orienté vers une destination unique, appelé DODAG (Destination-Oriented Directed Acyclic Graph), dont le nœud principal est désigné comme la racine DODAG.

Le protocole utilise une fonction objective (OF) pour définir la manière dont les métriques et contraintes de routage (comme la distance, l'énergie ou le nombre attendu de transmissions) influencent la construction de la topologie. Cela permet d'adapter la structure du réseau aux besoins spécifiques des applications.

RPL évite les boucles de routage en attribuant à chaque nœud un rang qui reflète sa position par rapport à la racine. Ce rang varie en fonction des métriques choisies, comme le nombre de sauts ou l'énergie disponible.

Pour maintenir et mettre à jour la topologie, RPL utilise quatre types de messages ICMPv6 :

- DIO (DODAG Information Object) : transmet des informations sur la topologie, comme le rang et l'adresse de la racine.
- DAO (Destination Advertisement Object) : propage les informations pour le trafic descendant.
- DIS (DODAG Information Solicitation) : permet à un nœud de demander des informations DIO.
- DAO-ACK : confirme la réception d'un DAO.

Pour minimiser la consommation d'énergie, RPL adapte la fréquence des messages de contrôle grâce à l'algorithme Trickle. En réseau stable, les messages sont rares, tandis qu'en cas de changements fréquents de topologie, leur fréquence augmente. Ainsi, RPL combine efficacité énergétique et adaptabilité aux environnements dynamiques.

II.8.2 CORPL (Cognitive Opportunistic Routing Protocol using RPL)

CORPL est une extension du protocole RPL qui intègre une approche de transfert opportuniste pour améliorer les performances des réseaux à pertes et les adapter aux environnements de radio cognitive [56]. Cette approche repose sur deux étapes principales:

- Sélection d'un ensemble de transferts : chaque nœud choisit plusieurs voisins comme candidats pour le saut suivant.
- Schéma de coordination : seul le meilleur candidat transmet chaque paquet, assurant une transmission unique et efficace.

CORPL utilise la structure DAG (Directed Acyclic Graph) de RPL pour construire sa topologie, tout en introduisant des modifications spécifiques pour prioriser dynamiquement les nœuds en fonction d'une fonction de coût. Cette priorisation aide à sélectionner des chemins avec un minimum d'interférences et optimise le temps de transmission pour protéger les émetteurs primaires (PU).

CORPL est conçu pour gérer des transmissions sensibles au délai, comme les alarmes prioritaires devant arriver à la passerelle avant une échéance. Cependant, les performances du réseau peuvent être dégradées lorsque certains nœuds effectuent une détection de spectre et sont incapables de transmettre ou recevoir des paquets. Pour atténuer cela, CORPL intègre des techniques spécifiques pour améliorer le débit, réduire la latence et minimiser les pertes de paquets.

Pendant le processus de construction du DAG, chaque nœud échange des informations via des messages DIO enrichis, permettant une mise à jour continue des informations de voisinage et une priorisation dynamique pour construire l'ensemble de transferts. Cette approche garantit une transmission efficace et robuste, même dans des conditions de réseau difficiles.

II.8.3 CTP (Collection Tree Protocol)

C'est un protocole de collecte basé sur une structure arborescente. Certains nœuds d'un réseau se déclarent comme racines de l'arbre, et les autres nœuds forment des arbres de routage pour atteindre ces racines [57]. Contrairement aux protocoles classiques, CTP est sans adresse explicite : un nœud choisit implicitement une racine en sélectionnant le prochain saut sur le chemin. Les routes vers les racines sont établies à l'aide d'un gradient de routage.

Le protocole repose sur certaines fonctionnalités fournies par la couche liaison de données :

- Une diffusion locale efficace.
- Des accusés de réception synchrones pour les paquets unicast.
- Un champ de type de protocole pour gérer plusieurs protocoles de niveau supérieur.
- Des champs pour les adresses source et destination sur un seul saut.

CTP utilise des estimations de la qualité des liens pour évaluer le nombre de transmissions nécessaires pour envoyer un paquet unicast avec un accusé de réception réussi. Bien qu'il inclue plusieurs mécanismes pour améliorer la fiabilité de la livraison, CTP ne garantit pas une livraison à 100 % ; il s'agit d'un protocole de "meilleur effort" qui optimise autant que possible ses performances

Conçu pour des réseaux à faible trafic, CTP est particulièrement adapté aux systèmes nécessitant une communication efficace et fiable. Cependant, dans les environnements où la bande passante est une ressource critique, un autre protocole pourrait être plus approprié, notamment ceux permettant de regrouper plusieurs petites trames en un seul paquet de la couche liaison.

II.8.4 LOADng (Lightweight On-demand Ad hoc Distance Vector Routing Protocol - Next Generation)

Ce protocole est une version simplifiée de l'AODV [54], spécialement conçue pour les réseaux LLN (Low-power and Lossy Networks). Basé sur l'idée que les LLN sont majoritairement inactifs, LOADng adopte une approche réactive : les routes vers les destinations sont établies uniquement lorsque des données doivent être transmises, évitant ainsi la surcharge inutile des approches proactives.

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

LOADng se distingue par son adaptabilité à divers modèles de trafic, sans dépendre de nœuds spécifiques exécutant des fonctions particulières, comme une racine, ce qui élimine les problèmes liés à ces dépendances. Son format de données compressé et flexible réduit les risques de fragmentation et lui permet de s'adapter à des applications nécessitant une taille MTU fixe. Cependant, il peut entraîner des délais plus élevés lors de la phase de découverte de route et générer une surcharge de trafic de contrôle importante, notamment dans les scénarios où le trafic est principalement de type point-à-point (P2P).

En tant que protocole réactif, LOADng repose sur quatre opérations principales :

- Génération de requêtes de routage (RREQ) par un routeur émetteur pour découvrir un itinéraire vers une destination.
- Transmission des RREQ jusqu'à ce qu'elles atteignent le routeur destinataire.
- Génération de réponses de routage (RREP) par le routeur de destination à la réception d'une RREQ.
- Transmission unicast des RREP vers l'émetteur, saut par saut.

Ce fonctionnement en fait un protocole flexible et efficace, particulièrement adapté aux environnements où la consommation énergétique et la simplicité de mise en œuvre sont prioritaires.

II.8.5 CARP (Channel-aware Routing Protocol)

Ce protocole [58] est conçu pour la transmission de données multi-sauts vers un puits dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN), avec une attention particulière aux environnements sous-marins. Il se distingue par la prise en compte explicite de la qualité de la liaison lors de la sélection des nœuds de relais pour garantir une transmission fiable. Cependant, les variations rapides des conditions des canaux sous-marins posent des défis : la capacité de deux nœuds à échanger des paquets de contrôle courts ne garantit pas nécessairement la transmission sécurisée de paquets de données plus volumineux.

CARP est un protocole de routage gourmand, sans localisation, et basé sur une sélection saut par saut, qui a démontré de meilleures performances par rapport à des protocoles tels que FBR et sa version améliorée EFlood. Bien qu'il soit globalement efficace, il peut générer des paquets de

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

contrôle inutiles lors de la sélection des relais, une situation qui pourrait être optimisée dans certains cas.

Les caractéristiques clés de CARP qui le rendent particulièrement adapté aux réseaux de capteurs sous-marins (UWSN) incluent :

- Utilisation de simples informations de topologie, comme le nombre de sauts, pour contourner les zones de connectivité limitée ou d'ombre, évitant ainsi les problèmes du routage géographique.
- Prise en compte de l'énergie résiduelle et de la capacité du tampon des nœuds pour améliorer l'efficacité du routage.
- Contrôle de puissance (si disponible) pour ajuster les niveaux de transmission, garantissant que les paquets de contrôle courts et les paquets de données plus longs subissent des taux d'erreur similaires.

Les performances et l'applicabilité de CARP ont été validées dans des environnements océaniques réels, confirmant sa pertinence pour les applications exigeantes des UWSN.

II.9 Défis de routage dans l'IoT

La diversité des dispositifs et des technologies impliqués dans l'Internet des Objets (IoT) rend les défis de routage variés et complexes [59]. Voici une liste des principales difficultés :

II.9.1 Interopérabilité

L'interopérabilité constitue l'un des défis majeurs de l'Internet des objets (IoT), notamment en raison de la diversité des appareils et des protocoles utilisés. L'IoT regroupe une multitude de technologies, chacune reposant sur des normes de communication spécifiques, ce qui complique le routage des données entre ces dispositifs. De plus, la coexistence d'environnements matériels et logiciels hétérogènes peut engendrer des problèmes de compatibilité, rendant le routage inefficace ou parfois impossible. Il devient alors essentiel de développer des approches qui permettent d'assurer l'interopération des technologies sous-jacentes pour améliorer le routage et garantir une communication fluide entre les systèmes connectés.

II.9.2 Sécurité

La sécurité constitue un enjeu critique dans le routage au sein de l'Internet des objets (IoT). Les données échangées sont particulièrement vulnérables aux interceptions et aux attaques malveillantes, d'autant plus que les dispositifs IoT présentent souvent une capacité limitée, une communication sans fil et des risques de pannes aléatoires, qu'elles soient temporaires ou permanentes. Ces vulnérabilités sont fréquemment exploitées par les attaquants, rendant indispensable l'intégration de mécanismes de sécurité robustes dans les protocoles de routage pour protéger les informations sensibles. Cela passe par l'authentification des dispositifs, le chiffrement des données en transit et la mise en place de contre-mesures efficaces permettant de détecter, diagnostiquer et neutraliser les attaques tout en maintenant un routage sécurisé. De plus, ces solutions doivent être légères et adaptées aux ressources limitées des dispositifs IoT afin d'assurer une récupération rapide et fiable en cas de menace.

II.9.3 Mobilité

La mobilité représente un autre défi majeur pour les implémentations de l'Internet des objets (IoT), car il est essentiel de garantir une communication continue avec les utilisateurs mobiles et d'assurer la fourniture de services, même lorsque les dispositifs sont en déplacement. Les interruptions peuvent survenir lors du transfert d'informations d'une passerelle à une autre, compromettant la fluidité des échanges. Pour surmonter ce problème, des approches telles que la mise en cache et le tunneling des services peuvent être utilisées. Ces techniques permettent aux applications d'accéder aux données, même lorsque les ressources sont temporairement indisponibles, assurant ainsi la continuité des services. Par ailleurs, il est crucial de concevoir des protocoles de routage adaptés à ces environnements dynamiques, capables d'anticiper et de gérer efficacement les transitions, afin de minimiser les pertes de données et d'optimiser la qualité des services rendus.

II.9.4 Gestion de l'énergie :

L'énergie est un paramètre essentiel dans la communication IoT, notamment pour garantir la durabilité et l'efficacité des dispositifs. La qualité des liens doit être évaluée selon certains indicateurs, la méthode la plus courante étant le comptage de sauts, où la route avec le nombre minimal de sauts est privilégiée. Cependant, cette approche n'est pas toujours optimale, car certains liens peuvent être sujets à des erreurs. Une meilleure alternative consiste à intégrer une

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

conscience énergétique dans les protocoles de routage existants. Par exemple, il est judicieux de sélectionner des nœuds disposant de plus d'énergie résiduelle pour prolonger la durée de vie des liens et des dispositifs.

De nombreux dispositifs IoT, tels que les capteurs sans fil alimentés par batterie, sont soumis à des contraintes énergétiques strictes. Le routage doit donc non seulement maintenir une communication efficace, mais aussi optimiser la consommation énergétique pour prolonger la durée de vie des batteries. Cela implique l'utilisation d'algorithmes avancés capables de choisir les chemins de transmission les plus efficaces en termes d'énergie, tout en tenant compte des contraintes liées à la fiabilité des liens et à l'équilibre des charges dans le réseau.

II.9.5 Latence et temps réel

Dans l'Internet des objets (IoT), le routage doit souvent répondre à des contraintes de temps réel, ce qui impose des exigences rigoureuses en matière de latence. Les applications critiques, telles que celles déployées dans le domaine médical ou industriel, exigent une transmission rapide et fiable des données pour garantir leur efficacité et leur sécurité. Une latence excessive peut entraîner des retards dans la prise de décisions ou dans l'exécution des actions, ce qui pourrait avoir des conséquences graves dans des contextes sensibles, comme les systèmes de santé connectés ou les chaînes de production automatisées.

Les défis liés à la réduction de la latence incluent la gestion des congestions réseau, l'optimisation des chemins de routage, et l'adoption de protocoles capables de prioriser les transmissions critiques. Il devient alors crucial d'intégrer des mécanismes avancés, tels que le traitement des données en périphérie (edge computing) ou le pré chargement de données, pour réduire les temps de réponse et améliorer la performance globale des systèmes IoT.

II.9.6 Fiabilité du réseau

La fiabilité du réseau constitue un facteur clé pour assurer la transmission continue et sans perte des données dans l'IoT. Étant donné que les réseaux IoT sont souvent exposés à des perturbations telles que des interférences ou des défaillances matérielles, garantir la stabilité des communications devient un véritable défi pour le routage. Ces risques peuvent entraîner des pertes de données ou des interruptions de service, ce qui nuit à l'efficacité des applications critiques.

Pour pallier ces problèmes, il est essentiel de mettre en place des mécanismes de redondance et de récupération qui permettent de maintenir une communication fluide, même en cas de panne ou d'instabilité du réseau.

II.10 Applications de l'IoT

Le domaine de l'IoT comprend une multitude d'appareils et d'applications différentes, qui requièrent des scénarios de mise en place et des exigences particulières [54]. La majorité de ces applications sont employées au quotidien :

- **Gestion de trafic :** Il n'est plus nécessaire d'avoir des policiers pour gérer le trafic routier. L'automatisation de tous les feux de signalisation permet de ne plus avoir besoin de signaux manuels et d'éviter les accidents.
- **Voitures autonomes :** Le conducteur n'est plus nécessaire dans une voiture, qui est entièrement automatisée grâce aux capteurs intégrés au véhicule.
- **Détection de tremblements de terre :** Les catastrophes naturelles comme les tremblements de terre, les tsunamis, etc., peuvent être détectées à l'avance grâce aux dispositifs IoT.
- **Médecine connectée :** Les médecins ont la possibilité de suivre leurs patients à distance, sans avoir à se rendre à la clinique.
- **Industrie automobile :** On intègre des capteurs de pointe dans les véhicules, les trains, les bus, etc. En utilisant la technologie RFID (Radio Frequency Identification), on peut améliorer la production et répondre aux attentes des clients en proposant plus de services.
- **Vie autonome :** Les personnes âgées bénéficient grandement des applications IoT, qui leur rappellent leurs médicaments et leurs activités à temps, tout en leur offrant un soutien pendant les dernières étapes de leur vie.
- **Commerce de détail et marketing :** L'intégration de l'IoT dans les secteurs du marketing et du commerce de détail présente de nombreux bénéfices. Par exemple, cela offre la possibilité de détecter la disponibilité des stocks et de facturer les produits en utilisant des étiquettes RFID.
- **Surveillance de l'environnement :** Les capteurs et les appareils RFID offrent une meilleure compréhension de la nature et donnent la possibilité de mesurer la pollution qui lui est causée.

- **Industrie des transports** : L'Internet des objets peut être employé dans les trains et les bus afin de recueillir les tarifs, ce qui permet de supprimer le système de péage.
- **Agriculture et élevage** : Grâce à l'Internet des objets, il est possible d'intégrer des technologies de pointe dans le domaine de l'agriculture, telles que l'emploi de drones pour l'agriculture et le nourrissage des animaux d'élevage.

II.11 Applications de l'IoT dans la santé

Le domaine de la santé est l'une des applications les plus prometteuses de l'IoT, où il modifie la façon dont les soins sont prodigués et surveillés.

- **Surveillance à distance des patients** : Grâce à l'IoT, les dispositifs de santé connectés, tels que les moniteurs de fréquence cardiaque ou les capteurs de glucose, permettent une surveillance continue des patients à distance. Cela est particulièrement utile pour les personnes atteintes de maladies chroniques ou nécessitant des soins intensifs, offrant une visibilité en temps réel sur leur état de santé.
- **Optimisation des soins** : L'IoT permet d'automatiser certains aspects des soins médicaux, comme l'envoi de rappels pour la prise de médicaments ou la génération d'alertes automatiques en cas d'anomalie dans les paramètres vitaux d'un patient. Cela améliore la gestion des maladies et permet une intervention rapide en cas de besoin.
- **Ambulances intelligentes et soins d'urgence** : Dans le cadre des ambulances intelligentes, les dispositifs IoT jouent un rôle clé en facilitant la transmission en temps réel des données médicales des patients vers les hôpitaux ou les centres de commande. Cela permet au personnel médical de préparer les traitements avant même l'arrivée du patient, améliorant ainsi l'efficacité des interventions d'urgence.

II.12 Conclusion

Le routage dans l'IoT est un domaine clé qui sous-tend le bon fonctionnement des réseaux connectés et des applications critiques. À travers ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance des protocoles de routage pour répondre aux exigences spécifiques des réseaux IoT, tels que l'efficacité énergétique, la sécurité, la fiabilité, et la gestion des flux de données en temps réel.

Chapitre II: Le routage dans l'internet des objets

Malgré les avancées réalisées, de nombreux défis subsistent, nécessitant des recherches continues pour développer des solutions innovantes et adaptées aux évolutions technologiques. Une compréhension approfondie des mécanismes de routage et de leurs limites est essentielle pour optimiser les performances des réseaux IoT et garantir leur pérennité dans des environnements de plus en plus complexes et dynamiques.

Chapitre III : Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil corporels

III.1 Introduction

Le routage est un élément fondamental dans les réseaux WBAN. Un protocole de routage est essentiel au système de communication d'un réseau informatique. Il définit les chemins à emprunter pour transmettre les données de leur source jusqu'à leur destination. En raison de la taille limitée de la batterie dans les nœuds des capteurs corporels, le protocole de routage est crucial pour établir un réseau corporel sans fil efficace et fiable. Les WBANs font face à des problèmes de routage cruciaux lors du routage des données, tels que la limitation de la puissance des capteurs, la nécessité de réduire la latence et la gestion de la mobilité des nœuds. Dans ce chapitre, nous abordons les défis des protocoles de routage pour les WBANs, puis nous examinons les cinq classes de protocoles de routage existants, ce qui est essentiel pour choisir le protocole de routage idéal pour l'application ciblée.

III.2 Le routage dans les WBANs

Le routage dans les réseaux WBAN fait référence au processus de sélection et de gestion des chemins optimaux pour la transmission des données entre les capteurs corporels et les dispositifs de collecte de données (sink). La communication entre les capteurs et le sink dans les réseaux WBAN peut se dérouler de deux manières comme le montre la figure III.1. A un seul saut, ou chaque capteur envoie directement ses données au sink; ou bien à plusieurs sauts ou les données des capteurs sont transmises au sink via plusieurs capteurs intermédiaires. Chaque capteur peut transmettre les données reçues d'autres capteurs, agissant comme un relais. La communication est déclenchée soit par une demande préalable du sink, soit par un envoi périodique prédéfini des données mesurées, ou encore par une alerte générée en cas de défaillance ou de dépassement d'un seuil prédéfini.

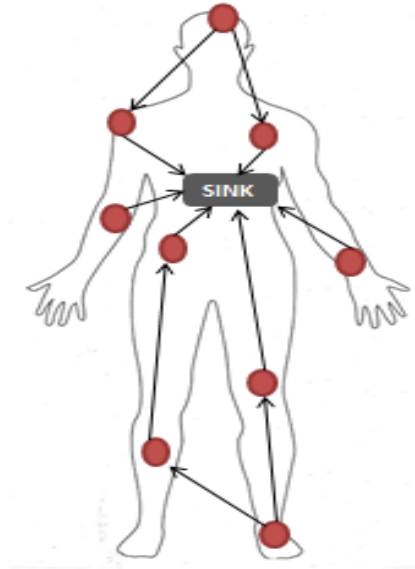


Figure III.1. Routage dans le WBAN

III.3 Critères de conception des protocoles de routage pour un réseau WBAN

Les WBAN sont particulièrement utilisés dans les domaines de la santé et du sport pour fournir des données en temps réel sur l'état physique des utilisateurs. La conception des protocoles de routage pour ces réseaux est cruciale pour garantir la fiabilité, l'efficacité énergétique et la sécurité des communications. Voici les principaux critères à considérer lors de la conception des protocoles de routage pour les WBAN.

III.3.1 Consommation énergétique

La gestion de l'énergie est l'une des principales problématiques des WBAN. Les méthodes de routage doivent être rendues aussi économes en énergie que possible, car les capteurs fonctionnent souvent avec de petites batteries. Chaque nœud inséré dans le corps d'une personne doit être capable de fonctionner pendant plusieurs années ; les stimulateurs cardiaques, par exemple, doivent fonctionner pendant au moins cinq ans [60]. L'utilisation de diverses technologies de récupération d'énergie doit également être explorée afin d'améliorer la durée de vie des batteries. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour rendre ces capteurs plus économes en énergie [61]. Cela peut être accompli par :

- L'optimisation des chemins de routage pour réduire la distance et le nombre de sauts.
- La mise en veille des capteurs lorsqu'ils ne sont pas en usage.
- L'utilisation de techniques de transmission à faible puissance.

III.3.2 Fiabilité et tolérance aux pannes

La fiabilité est cruciale dans les applications de santé où les données doivent être transmises de manière fiable et en temps opportun. Elle peut être évaluée par la qualité de la liaison entre les nœuds ou par l'efficacité de la communication de bout en bout. Cependant, dans un WBAN, la tolérance aux pannes signifie que le réseau limite l'impact des défaillances afin d'affecter le moins de composants possible [62]. Les protocoles de routage doivent donc :

- Assurer des chemins de routage redondants pour éviter les points de défaillance uniques.
- Inclure des mécanismes de détection et de correction des erreurs.
- Gérer les interférences et la perte de signal.

III.3.3 Latence et délai de transmission

Les applications médicales nécessitent souvent des délais de transmission très courts. Les réseaux WBAN utilisent des communications à un seul ou plusieurs sauts [63]. La transmission à plusieurs sauts renforce la robustesse des liens, augmentant ainsi la fiabilité globale du système. Toutefois, la consommation d'énergie croît proportionnellement au nombre de sauts : plus il y a de sauts, plus la consommation énergétique augmente [64]. Pour cela, le protocole de routage doit :

- Réduire la latence en choisissant des chemins de routage rapides.
- Prioriser les données en fonction de leur criticité pour assurer un délai de livraison minimal pour les données urgentes.
- Gérer efficacement les files d'attente pour éviter les congestions.

III.3.4 Sécurité et confidentialité

Les données de santé sont sensibles et nécessitent une protection robuste. La confidentialité désigne le fait que les données collectées des nœuds capteurs ne peuvent être consultées ou utilisées que par des entités autorisées [65]. Les réseaux WBAN ne peuvent pas utiliser les techniques classiques de sécurisation à cause de leurs limitations en énergie et en puissance de calcul. A cet égard, les chercheurs travaillent sur le développement des protocoles de routages qui doivent :

- Assurer la confidentialité des données transmises en utilisant des techniques de cryptage.
- Garantir l'intégrité des données pour éviter les altérations malveillantes.
- Authentifier les nœuds pour prévenir l'accès non autorisé.

III.3.5 Adaptabilité et scalabilité

L'adaptabilité dans les WBAN est essentielle pour faire face aux défis uniques posés par les mouvements et les changements dynamiques dans l'environnement immédiat. Les capteurs peuvent se déplacer ou être obstrués par des mouvements corporels, modifiant la topologie du réseau de manière imprévisible [66]. La scalabilité est la capacité du protocole de routage à fonctionner efficacement même avec une augmentation significative du nombre de nœuds dans le réseau. Les WBAN doivent s'adapter à des variations dans l'environnement et la mobilité des utilisateurs et les protocoles de routage utilisés sont conçus à :

- Être flexible pour s'adapter aux changements de topologie causés par les mouvements du corps.
- Supporter l'ajout de nouveaux capteurs sans nécessiter une reconfiguration majeure.
- Gérer efficacement les ressources pour maintenir les performances même lorsque le nombre de nœuds augmente.

III.3.6 Comptabilité avec les normes existantes

Le protocole de routage doit être compatible avec les normes existantes pour assurer une interopérabilité et une intégration faciles. Il est considéré à être conforme aux standards de

communications tels que IEEE 802.15.6, et à assurer une compatibilité inter-protocoles avec d'autres réseaux de capteurs et infrastructures médicales.

III.4 Protocoles de routage dans les réseaux WBANs

Le routage des données est une tâche essentielle dans les réseaux WBAN, qui peut être réalisée à l'aide de différents protocoles. Ces protocoles de routage ont été élaborés afin de satisfaire aux exigences particulières des WBAN, telles que la diminution de la consommation d'énergie, la fiabilité et la sécurité. Chaque genre de protocole possède des particularités et des bénéfices spécifiques. Ces protocoles de routage ont pris en compte les caractéristiques des nœuds capteurs en fonction des exigences de l'application et de l'architecture. Comme le montre la figure III.2, il est possible de classer tous les protocoles de routage en cinq catégories [4]: à base de température, à base de qualité de service, à base de posture, cross-layer, et à base de cluster. Les caractéristiques de ces protocoles de routage ainsi que la description de ces catégories sont exposées ci-après.

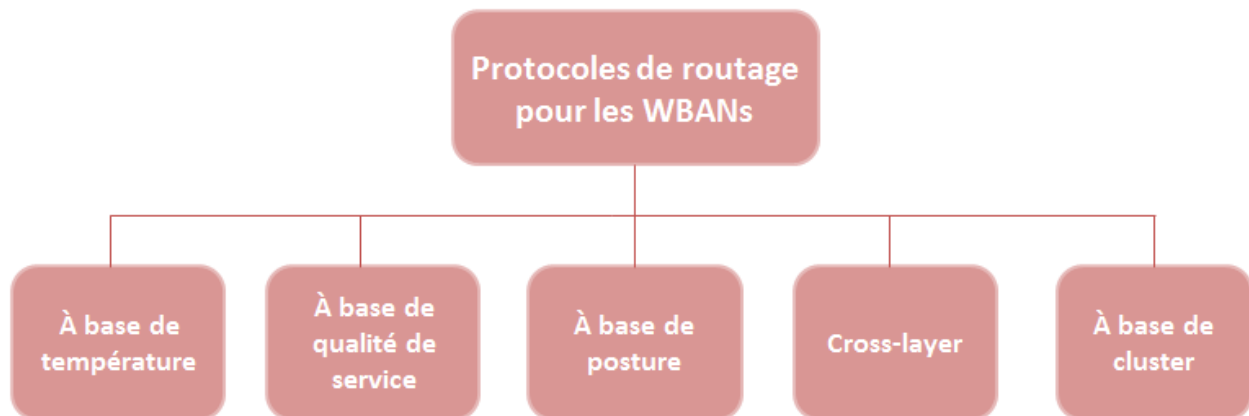


Figure III.2. Catégories de protocoles de routage pour les WBANs

III.4.1 Les protocoles à base de température

Les réseaux corporels sans fil appelés WBAN sont constitués d'un ensemble de biocapteurs qui peuvent être insérés dans le corps humain. Ils communiquent entre eux en utilisant les ondes

radio. Les signaux radio utilisés dans les communications sans fil créent des champs magnétiques et électriques en raison de l'utilisation d'une antenne radio. Le rayonnement de l'antenne absorbé et la consommation électrique des circuits des nœuds lors de leurs activités provoquent une hausse des températures, notamment dans les nœuds implantés [67]. La hausse de la température peut avoir un impact négatif sur le corps humain. De cette manière, la circulation sanguine sera diminuée et les organes sensibles risquent de subir de sérieux dégâts thermiques. En particulier, une augmentation prolongée de la température dans les tissus du corps peut causer des dommages aux tissus, diminuer le flux sanguin dans certains organes et entraîner des réactions enzymatiques [68].

Depuis quelques années, de nombreux scientifiques ont cherché à résoudre le problème de l'élévation de la température et de la surchauffe. Les protocoles de routage basés sur la température pour les WBANs ont pour but de réduire au minimum la température des nœuds du corps embarqués, ou d'éviter les nœuds chauds lors de la sélection des chemins de routage de données afin de minimiser leurs températures.

Dans cette section, nous abordons quelques protocoles de routage à base de température qui ont été proposés au cours des dernières années.

III.4.1.1 Thermal-Aware Routing Algorithm

TARA ou Thermal-Aware Routing Algorithm [67] est un protocole de routage spécialement développé pour les réseaux WBAN (réseau de zone corporelle sans fil) dans le but de gérer la température et d'éviter la surchauffe des nœuds. Ce protocole revêt une importance particulière dans le cadre des WBAN où les capteurs entrent en contact direct avec le corps humain. TARA vise principalement à réduire au minimum l'augmentation de la température des nœuds du réseau. Il surveille en permanence la température des nœuds et prend des décisions de routage basées sur cette information. Selon le protocole, les nœuds présentant une température élevée (supérieure à un certain seuil) sont considérés comme des hotspots ; et il redirige le trafic des nœuds surchauffés vers des nœuds plus froids pour éviter la formation de zones chaudes. Cela aide à maintenir une température sûre et uniforme à travers le réseau. Quand la température d'un nœud dépasse un seuil donné, TARA met en marche des mécanismes de retrait afin de répartir la charge de trafic. Cela permet de prolonger la durée de vie des nœuds en évitant leur dégradation due à

une surchauffe prolongée. Cependant, son implémentation nécessite une considération attentive des coûts et de la complexité associés à la gestion thermique.

III.4.1.2 Hotspot Preventing Routing

L'objectif principal du protocole HPR [68] est de prévenir la création de points chauds (hotspots) dans le réseau. Son but est de prévenir la création de points chauds en répartissant de manière uniforme la charge de routage entre les nœuds du réseau. Cela permet d'éviter la surchauffe dans des points particuliers, ce qui pourrait provoquer une panne du système ou des dégâts aux éléments du réseau. Chaque nœud du réseau est constamment en train de surveiller sa propre température ainsi que celle des voisins. Quand un nœud est chargé de transmettre des données, il sélectionne le chemin de routage en se basant sur la température des nœuds voisins, afin de minimiser les sauts depuis les nœuds sources vers les nœuds destination en utilisant l'algorithme SHR. Il est important de souligner que dans HPR, un hotspot est un nœud dont la température dépasse la moyenne de la température de l'émetteur et de ses voisins, en plus de la valeur de seuil (threshold). Il utilise le paramètre seuil MAX_HOPS pour rejeter les paquets qui dépassent cette valeur, ainsi qu'une liste de nœuds récemment visités pour empêcher toute boucle de routage. HPR utilise des mécanismes pour tempérer la communication, c'est-à-dire qu'il réduit ou ajuste la fréquence des transmissions si un nœud atteint une température critique. HPR évite que les paquets prennent des chemins inutilement longs et est plus efficace pour réduire le délai moyen de livraison des paquets.

III.4.1.3 Mobility supporting Adaptive Threshold-based Thermal-aware Energy efficient Multi hop Protocol

Il s'agit d'un protocole de routage présenté en 2013 [69]. Il a été conçu pour diminuer la température des nœuds, les délais d'acheminement des données critiques et la consommation d'énergie des nœuds, tout en favorisant la mobilité. Son objectif est de s'ajuster aux variations de position des nœuds provoquées par les mouvements du corps. Cela assure la stabilité de la connectivité et la fiabilité de la communication, même lorsque les nœuds sont en mouvement. Selon M-ATTEMPT, il est supposé que le sink est positionné au centre du corps humain, tandis que les nœuds sont disposés autour de celui-ci en fonction d'un ordre décroissant de leur débit de transmission. Pour prendre en charge la mobilité, les nœuds à haut débit sont positionnés dans les

zones moins mobiles du corps afin qu'ils puissent servir de nœuds relais pour les autres nœuds en fournissant une connexion directe au sink. M-ATTEMPT différencie les transmissions en fonction de deux types de données : critiques et ordinaires. Pour les données critiques, les biocapteurs augmentent leur puissance de transmission pour envoyer ces paquets directement au nœud récepteur, souvent le sink, en un seul saut. En revanche, les données ordinaires utilisent une communication multi-sauts. Si plusieurs chemins avec le même nombre de sauts existent, M-ATTEMPT privilégie celui qui consomme le moins d'énergie. M-ATTEMPT surveille continuellement la température des nœuds pour prendre des décisions de routage et éviter la surchauffe. Lorsqu'un nœud dépasse un seuil de température défini, il est exclu des transmissions de données. Pour gérer la température des nœuds, M-ATTEMPT fixe un seuil critique : si un nœud voisin dépasse ce seuil, toutes les routes vers ce nœud sont coupées. Si un nœud atteint ce seuil après avoir reçu un paquet de données, il renvoie le paquet au nœud précédent, qui marque alors ce nœud comme un point chaud.

III.4.1.4 Trust and Thermal Aware Routing Protocol

Le protocole TTRP [70] est conçu pour les réseaux WBAN avec une double considération de la confiance et de la gestion thermique des nœuds. Autrement dit, il garantit la protection de la communication contre les nœuds défaillants et défectueux, et évite la formation des nœuds chauds dans le réseau. Dans TTRP, deux types de nœuds capteurs sont utilisés : les nœuds capteurs biomédicaux et les nœuds relais. Les nœuds capteurs biomédicaux se limitent à générer des paquets de données et ne participent pas au transfert de ces données. Les nœuds relais, quant à eux, sont chargés de transmettre les paquets de données vers leur destination. Ces nœuds relais évaluent l'augmentation de la température de leurs voisins en comptant le nombre de paquets qu'ils reçoivent et transmettent. De plus, la puissance de détection des nœuds relais est sensiblement supérieure à celle des nœuds capteurs biomédicaux. Ce protocole se compose de trois phases principales : l'estimation de la confiance, la découverte d'itinéraires et la maintenance des itinéraires. La première phase évalue la fiabilité des nœuds relais en utilisant divers critères pour assurer que seuls les nœuds dignes de confiance participent au routage des données. La deuxième phase vise à identifier les chemins les plus fiables et exempts de points chauds (hotspots) à travers le réseau, garantissant ainsi que les données sont transmises de manière sécurisée et efficace. Et la troisième phase intervient lorsqu'un déficit de confiance est détecté ou

qu'un nœud devient un point chaud. Elle est responsable de la reconfiguration dynamique des routes pour exclure ces nœuds problématiques et trouver de nouvelles routes actives, maintenant ainsi la robustesse et la fiabilité du réseau.

III.4.2 Les protocoles à base de qualité de service

Dans les réseaux WBAN, les protocoles de routage axés sur la qualité de service (QoS) sont des mécanismes de routage qui incluent des critères de performance spécifiques afin d'assurer une transmission efficace et fiable des données en fonction de leurs exigences de qualité. Divers paramètres tels que la latence, la bande passante, la fiabilité, l'efficacité énergétique et la priorité des données sont évalués et optimisés par ces protocoles afin de garantir une transmission adaptée aux besoins de diverses applications. Le but principal de ces protocoles est de garantir la transmission rapide et fiable des données critiques, tandis que les données moins urgentes peuvent supporter des délais plus longs.

Les protocoles de routage basés sur la QoS évaluent en temps réel l'état du réseau et adaptent les routes de manière dynamique afin de répondre aux exigences de qualité de service. Ils ont la possibilité d'utiliser différentes métriques afin d'évaluer les différentes routes envisageables, et ils incluent des modules supplémentaires où chaque module correspond à l'une de ces métriques. En général, trois modules sont présents [71] : 1) le module garantissant l'efficacité énergétique, 2) le module garantissant la fiabilité et 3) le module sensible au retard. Ainsi, ces méthodes garantissent une fiabilité accrue, un délai de livraison plus court avec un taux de livraison de paquets plus élevé, tout cela en réduisant la consommation d'énergie. La création de ces protocoles est une tâche extrêmement complexe, car il est nécessaire de garantir la coordination entre ces différents modules, ce qui accroît leur complexité [17].

Différents protocoles basés sur le QoS ont été suggérés. Dans ce qui suit, nous allons mentionner certains d'entre eux.

III.4.2.1 QoS-aware Peering Routing protocol for Delay sensitive data

Le protocole QPRD [72] a été développé spécifiquement pour les réseaux de capteurs corporels utilisés dans les établissements hospitaliers, en mettant l'accent sur la gestion de la qualité de service (QoS) pour les données sensibles aux délais. Une approche novatrice est proposée par QPRD pour assurer une transmission fiable de paquets ordinaires et de paquets sensibles au délai.

Les données sont classées en fonction de leur sensibilité aux délais. Les données critiques, telles que les signaux vitaux et les alertes d'urgence, sont prioritaires par rapport aux données moins urgentes. Le QPRD proposé offre un mécanisme sophistiqué pour : d'abord, calculer les délais en évaluant les retards de nœud et les retards de trajet pour tous les chemins possibles allant du nœud source à la destination, en tenant compte des caractéristiques dynamiques du réseau, ensuite, déterminer le meilleur chemin afin d'identifier et sélectionner l'itinéraire optimal qui assure la transmission la plus efficace et la plus rapide des données, en s'appuyant sur une analyse détaillée des délais et des performances des chemins disponibles, enfin, choisir le meilleur prochain saut en sélectionnant le nœud suivant le plus approprié pour le transfert de données en fonction des exigences spécifiques de délai du paquet, garantissant ainsi que les données critiques sont acheminées de manière prioritaire et fiable. Pour chaque destination, la table de routage contient des informations précises sur le périphérique de saut suivant qui est connecté au chemin présentant la latence de bout en bout la plus faible. Ainsi, pour tout paquet de données sensibles aux délais, si le délai de trajet est inférieur ou égal au délai requis, le nœud source envoie le DSP (Delay Sensitive Packets) par ce chemin optimal. Grâce à cette méthode, QPRD offre une transmission de données rapide et performante, en réduisant les délais et en optimisant la fiabilité, ce qui est crucial pour les applications sensibles au temps, notamment dans les environnements hospitaliers.

III.4.2.2 QoS aware Peering Routing protocol for Reliability sensitive data

Le protocole QPRR [73] a été développé pour les réseaux de capteurs corporels utilisés dans les établissements hospitaliers, en mettant l'accent sur la fiabilité et la qualité de service (QoS) des données sensibles. Lorsqu'un patient se déplace dans un hôpital, il peut être nécessaire de modifier l'unité d'affichage spécifique qui affiche les informations du patient. Pour résoudre ces problèmes, il est essentiel de mettre en place un nouveau protocole de routage basé sur la qualité de service pour assurer une communication BAN fiable, qui affiche de manière fiable les données critiques des patients en temps réel. En outre, ce protocole de routage a été développé dans le but de permettre une découverte dynamique du dispositif d'affichage médical spécifique même lorsque le patient est transféré d'une chambre à une autre dans un hôpital. Le QPRR suggéré est mis en œuvre dans le contexte de la collaboration BAN proposée dans des recherches précédentes et utilise à la fois des méthodes centralisées et distribuées. La méthode centralisée consiste à

stocker les données des BAN et des unités d'affichage dans un ordinateur central, ce qui permet d'améliorer la confidentialité et de mieux contrôler la communication des BAN. Par ailleurs, la distribution des données BAN sur l'unité d'affichage permet de diminuer la charge du trafic réseau et d'améliorer la surveillance des signes vitaux même lorsque le patient est en mouvement. QPRR assure que les données sensibles et critiques sont transmises de manière fiable en intégrant des mécanismes robustes de sélection et de maintenance des routes, qui sont choisies en fonction de leur capacité à assurer une transmission fiable des données. Cela contribue à la sécurité et à l'efficacité des soins aux patients.

III.4.2.3 Efficient Next hop Selection Algorithm for Multi-Hop Body Area Networks

Il s'agit d'un protocole de routage développé dans le but d'améliorer la sélection du prochain saut dans les réseaux de capteurs corporels multi-sauts (WBAN) en prenant également en considération les exigences de qualité de service telles que le délai et la fiabilité [74]. Le protocole suggéré prend en compte le nombre de sauts et le coût de liaison des nœuds voisins afin de choisir le nœud de saut le plus approprié pour le transfert de paquets suivant. Le coût de la liaison est calculé en utilisant l'énergie résiduelle, la taille de la file d'attente disponible et la fiabilité de la liaison d'un nœud voisin. Les voisins de chaque nœud sont évalués en fonction des critères de sélection. Chaque nœud choisit un nœud adéquat parmi ses nœuds voisins comme nœud de saut suivant, avec le nombre minimum de sauts jusqu'au sink et le coût de liaison maximum. L'algorithme de routage tient donc compte non seulement des exigences de qualité de service, mais aussi de la consommation d'énergie des nœuds afin d'améliorer les performances du réseau en ce qui concerne le délai et la fiabilité globale. L'ENSA-BAN utilise différents critères pour évaluer et classer les nœuds, ce qui permet d'améliorer l'efficacité énergétique, la fiabilité de la transmission et de réduire les délais.

III.4.2.4 Q-learning-based QoS-aware routing

Le protocole QQAR [75] a été élaboré dans le but de garantir la qualité de service (QoS) dans les réseaux WBAN dans le cadre des technologies de l'Internet des objets médical (IoMT) et des applications de santé intelligente. Dans ce protocole, les données des nœuds voisins à deux sauts ont été utilisées afin de garantir la fiabilité de la liaison entre la source et la destination. En outre, l'utilisation de données de voisinage à deux sauts permet d'améliorer la visibilité locale du réseau,

ce qui se traduit par une meilleure efficacité de routage, en respectant le délai de livraison des paquets et en assurant la livraison garanti. Afin de garantir une qualité de service optimale, les paquets ont été réparti en fonction de leur importance. La fiabilité de la liaison, le respect du délai de transmission des paquets, le délai E2E, la charge de trafic et la consommation d'énergie entre la source et la destination ont été considérés comme des paramètres de QoS. QQAR fait appel à un algorithme de Q-learning afin d'acquérir des connaissances et d'améliorer les choix de routage. Le Q-learning est utilisé par chaque nœud de capteur afin d'évaluer les récompenses liées à diverses actions de routage telles que le choix du prochain saut et d'apprendre à choisir les actions qui optimisent la QoS. Dans le processus de Q-learning, des récompenses positives sont données pour les décisions de routage qui améliorent la QoS (comme une latence réduite ou une consommation d'énergie optimisée), tandis que des pénalités sont appliquées pour les décisions qui dégradent la QoS. Grâce à l'utilisation du Q-learning pour l'amélioration dynamique des routes, QQAR garantit une qualité de service exceptionnelle, une efficacité énergétique et une capacité d'adaptation aux évolutions du réseau.

III.4.3 Les protocoles à base de posture

Les réseaux WBAN utilisent des protocoles de routage basés sur la posture afin d'améliorer la transmission des données en prenant en considération les postures et les mouvements du corps humain. Ils sont suggérés afin de résoudre les interruptions et les déconnexions des connexions entre deux nœuds (ou plus) qui entraînent un découpage du réseau. Les mouvements posturaux du corps humain sont responsables de ces interruptions, ce qui entraîne des modifications fréquentes dans la structure des WBANs [17]. Ces protocoles modifient de manière dynamique les chemins de transmission en fonction des variations de position du corps, telles que l'assise, la descente, le couché ou le mouvement. Par exemple, lorsque le corps passe d'une position debout à une position couchée, les routes sont réajustées pour maintenir une connectivité optimale.

Afin de remédier à la déconnexion des liaisons, les protocoles utilisent une fonction de coût qui est régulièrement mise à jour en fonction de l'état des liens. Le meilleur moyen d'acheminer les paquets vers le sink est celui qui présente la valeur minimale de la fonction de coût. Les routes sont continuellement surveillées et réajustées en fonction des changements de posture et des mouvements du corps pour éviter les interruptions de la transmission. Toutefois, ces protocoles

requièrent une grande quantité de transmissions afin de mettre à jour les informations relatives aux états des liaisons, ce qui entraîne une consommation d'énergie accrue.

Nous examinons dans cette partie quelques protocoles de routage basés sur la posture qui ont été suggérés ces dernières années.

III.4.3.1 Opportunistic Routing for Body Area Network

Les connexions entre les nœuds du WBAN sont souvent altérées en raison de la mobilité du corps. Cela peut engendrer un défi considérable, en particulier en ce qui concerne l'efficacité énergétique. Ce protocole [76] suggère une approche pratique pour exploiter les mouvements du corps lors de la marche pour prolonger la durée de vie du réseau. Ce travail élargit la collaboration entre les nœuds dans le cas où certains nœuds se trouvent sur des parties mobiles du corps telles que les mains. Dans ce schéma, l'utilisation du mouvement régulier de la main causé par la marche est utilisée pour un schéma de codage opportuniste. Contrairement au routage traditionnel, où les routes sont préétablies, le protocole OP sélectionne dynamiquement les routes en fonction de l'opportunité présente. Il utilise des critères comme la qualité du lien, l'état de la batterie, et la position des nœuds pour décider du prochain saut. Il est supposé qu'un capteur se trouve sur la poitrine et enregistre régulièrement des données du corps, puis les envoie à un réseau externe via le nœud sink situé au poignet. Un nœud relais est utilisé sur la taille et sur le côté où il se trouve en position de ligne de vue, avec à la fois le capteur thoracique et le nœud sink. On sélectionne en temps réel les nœuds candidats pour le prochain saut, ce qui permet d'exploiter les meilleures opportunités disponibles lors de la transmission. On peut observer que le schéma de routage opportuniste permet de conserver l'énergie du nœud relais, ce qui permet d'accroître la durée de vie globale du réseau.

III.4.3.2 Energy Efficient Thermal and Power Aware

Le protocole ETPA [77] est une combinaison de protocoles de routage d'état de liaison et de température, qui prend également en considération la puissance du signal reçu des nœuds voisins qui sont utilisés dans le calcul de la fonction de coût. Chaque cycle (toutes les quatre trames) permet à chaque nœud de transmettre sa température et son niveau d'énergie disponible en utilisant un message HELLO dans son créneau horaire assigné à tous ses nœuds voisins. Par la suite, chaque nœud évalue la puissance reçue de ses nœuds voisins. Ainsi, le nœud i peut estimer

le coût de transmission vers le nœud j . Dans la trame suivante, chaque nœud qui a un paquet à envoyer recherche le nœud avec le coût minimal et lui transmet le paquet. Si aucun nœud approprié n'est trouvé, le paquet est conservé sur le nœud d'origine. Cela entraîne une optimisation du calcul des routes pour le flux de paquets, ce qui entraîne une meilleure efficacité énergétique, un nombre réduit de sauts de paquets, une température équilibrée et une dispersion de la communication entre tous les nœuds, ce qui rend la gestion des ressources disponibles plus efficace.

III.4.3.3 Prediction-based secure and reliable routing framework

Le PSR [78] est conçu pour les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN) afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité de la transmission des données. Il est possible de l'intégrer à un protocole de routage particulier afin d'améliorer sa fiabilité et de prévenir les attaques par injection de données lors de la transmission de données. Les algorithmes de prédiction utilisés par le PSR permettent d'anticiper les mouvements des nœuds corporels, ce qui permet d'améliorer le routage en fonction des positions futures des nœuds. Dans le PSR, en se basant sur les mesures précédentes de la qualité des liens, chaque nœud prédit la qualité de chaque lien accessoire et choisit un groupe de liens accessoires qui peuvent être utilisés pour transmettre des paquets vers le récepteur de données. Parmi ces liens, il sélectionne celui qui présente la qualité prédite la plus élevée comme chemin de routage pour le prochain saut. Le PSR intègre des mécanismes d'authentification pour vérifier l'identité des nœuds et des techniques de chiffrement pour protéger les données contre les accès non autorisés. Les nœuds utilisent des techniques légères d'authentification des sources et des données spécialement conçues afin de garantir la sécurité de la transmission des données. De plus, chaque nœud peut activer ou désactiver l'authentification de source de manière adaptative en fonction d'un changement d'ensemble de voisins prédictifs et d'une précision de prédiction, afin de filtrer rapidement les demandes d'authentification de source erronées. Ses capacités d'adaptation aux changements dynamiques de la topologie du réseau et son optimisation de la consommation d'énergie en font une solution particulièrement adaptée aux environnements WBAN.

III.4.3.4 Posture aware-dynamic data delivery

Le protocole Posture Aware Dynamic Data Delivery (PA-DDD) [79] est conçu pour optimiser la livraison de données dans les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN) en tenant compte de la mobilité posturale des utilisateurs. L'objectif de cette approche est de résoudre les problèmes liés aux effets d'ombre engendrés par les modifications de la posture du corps humain. Le protocole PA-DDD suggéré se focalise sur l'efficacité de la transmission des données lorsqu'un individu marche librement et n'a pas de rythme de mouvement corporel constant. En utilisant des données telles que l'accélération et l'orientation, les capteurs repèrent en temps réel la position du corps. Pour classifier différentes postures du corps humain, le PA-DDD utilise l'algorithme IIC K-means (Improved Initial Centroid K-means), suivi d'un réseau neuronal de rétro-propagation comme classificateur permettant de reconnaître la posture du corps humain. De cette manière, il est capable d'attribuer les échantillons de posture aux clusters adéquats avec une précision et une efficacité supérieures par rapport à l'algorithme de clustering K-means initial. Cette approche assure l'intégralité du processus de clustering en réduisant le temps de calcul sans compromettre l'exactitude des clusters. Les routes de transmission des données sont adaptées de manière dynamique en fonction de la posture détectée par le protocole. Cela aide à éviter les routes qui sont affectées par les effets d'ombre et à opter pour des voies plus sûres. Il a également la capacité de faire des commutations entre divers liens de communication afin de maintenir une connexion stable et diminuer la perte de paquet.

III.4.4 Les protocoles Cross-layer

Les protocoles cross-layer sont des solutions intégrées qui coordonnent plusieurs couches de la pile de protocoles pour optimiser la performance globale du réseau. Dans ce modèle, les différentes couches de la pile protocolaire échangent leurs données et paramètres. Cela favorise l'amélioration des performances globales du réseau en prenant des décisions en se basant sur ces informations.

Ces protocoles offrent diverses options par rapport au modèle en couches traditionnel. Par exemple, il est possible de concevoir de nouvelles interfaces afin de gérer la connexion et le flux d'informations entre les différentes couches, ainsi que de fusionner les couches adjacentes pour créer une nouvelle couche (super couche) en fusionnant les services fournis par deux couches ou plus différentes [17]. Ces protocoles, en intégrant les fonctions de différentes couches, permettent

de surmonter les défis propres aux WBAN, tels que la mobilité des nœuds et les contraintes énergétiques, tout en garantissant une transmission fiable et efficace des données. Néanmoins, leur réalisation requiert une gestion soignée de la complexité et des ressources afin d'optimiser les profits.

Différents protocoles cross-layer pour WBAN ont été suggérés afin de faire face aux défis spécifiques liés aux collisions, aux retards, à la fiabilité et à l'énergie. Dans ce qui suit, nous allons définir certains d'entre eux.

III.4.4.1 Wireless Autonomous Spanning tree Protocol

Le WASP [64] est un protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN) multi sauts. Il vise à organiser les nœuds de manière hiérarchique pour optimiser la communication et la gestion de l'énergie dans le réseau. Il fait appel à des méthodes multicouches afin d'assurer une coordination des accès au support et de gérer le trafic. En installant un arbre couvrant (spanning tree) et en diffusant des messages de schéma sur celui-ci, le trafic dans le réseau est régulé. Ces messages sont utilisés à la fois par le parent et les enfants de chaque nœud de l'arborescence. Ensuite, on utilise ce spanning tree afin de transmettre les données au récepteur et de distribuer les différents emplacements de manière équitable. Chaque nœud donnera à ses enfants un message spécifique pour leur indiquer où ils peuvent envoyer leurs données, à savoir un schéma WASP. Chaque nœud possède son propre schéma WASP, qui est développé dans le nœud qui envoie le schéma. L'une des caractéristiques de WASP est l'utilisation à double tour des schémas WASP en tirant parti de la nature de diffusion des liaisons sans fil. Un nœud utilise les schémas afin de maîtriser le trafic de ses enfants tout en sollicitant davantage de ressources de la part de son parent pour ces derniers. Cela permet de réduire la charge de coordination en utilisant chaque schéma par le parent et les enfants du nœud expéditeur. Les données sont transmises le long des branches de l'arbre, en passant par les nœuds parents jusqu'à atteindre la passerelle ou le sink. Ce mécanisme permet d'assurer un routage fiable et économe en énergie. WASP adopte une méthode multicouche où le contrôle d'accès au support et le routage sont gérés par le même arbre couvrant, ce qui permet d'accélérer le débit et de réduire la consommation d'énergie.

III.4.4.2 Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment

CICADA [80] est un protocole économe en énergie conçu pour les réseaux corporels mobiles sans fil et à multi-sauts. Le protocole organise de manière distribuée une arborescence de réseau. Ensuite, on utilise cette structure arborescente afin d'assurer un accès sans collision au support et de transmettre les données au récepteur. Un spanning tree est créé de manière autonome et sert à transférer les données des nœuds vers le récepteur. À chaque cycle, l'arborescence permet de distribuer des times slots aux différents nœuds de manière équitable ce qui permet de minimiser les interférences et d'éviter une écoute passive. Un tel cycle est divisé par CICADA en un sous-cycle de contrôle et un sous-cycle de données, ce qui permet de réduire le délai et d'introduire une robustesse de mobilité. Il est envisageable de synchroniser les slots car un nœud est informé de la durée de chaque cycle et chacun informe ses enfants lorsque leurs données sont autorisées à être envoyées. Dans CICADA, le routage n'est en aucun cas complexe car les paquets de données sont envoyés vers le haut de l'arborescence qui est configurée pour contrôler l'accès au support. Cela contribue à réduire les collisions et à optimiser la transmission des données.

III.4.4.3 Timezone COordinated Sleep Scheduling

TICOSS [81] est un protocole de gestion de l'énergie basé sur la synchronisation des périodes de veille et de sommeil des nœuds capteurs selon des fuseaux horaires prédéfinis. Il s'agit d'un protocole cross-layer car il établit une étroite coordination entre le comportement du MAC et de la couche de routage qui était inspirée des fonctions de routage de MERLIN [2 TICOSS]. La division du réseau en fuseaux horaires est adoptée par TICOSS, qui utilise la table V pour planifier les transmissions et met en place trois tampons FIFO pour : (1) les paquets en amont destinés à la passerelle ; (2) les paquets en aval destinés au réseau ; (3) les paquets pour la diffusion locale. Cela permet de coordonner les périodes où les nœuds sont actifs (veille) et inactifs (sommeil), ce qui réduit les risques de collisions de données, garantissant ainsi une transmission plus fiable et efficace. La planification par table V consiste principalement à séparer le temps en slots qui sont ensuite utilisés pour transmettre les paquets depuis les tampons. TICOSS apporte trois grandes contributions : il permet aux nœuds d'alterner des périodes d'activité et d'inactivité afin de faire des économies d'énergie ; il réduit les collisions de paquets

causées par les terminaux cachés des réseaux en étoile proches ; et il offre le chemin le plus court pour les paquets d'un nœud vers la passerelle la plus proche.

III.4.4.4 Cross Layer Broadcast Protocol

Le protocole CLBP [82] est utilisé pour diffuser des messages d'urgence dans un réseau IVC (Inter-Vehicle Communication) multi-sauts, dans le but d'améliorer la fiabilité de la transmission et de réduire la redondance des messages simultanément. Étant donné les spécificités des réseaux de véhicules, CLBP adopte une nouvelle métrique de relais qui combine des emplacements géographiques, des conditions de canal de couche physique et des vitesses de déplacement des véhicules. En se basant sur cette métrique, le protocole propose ensuite un schéma de sélection de relais révisé de demande d'envoi/autorisation d'envoi RTS/CTS (request-to-send/clear-to-send) afin de choisir de manière distribuée un nœud de relais approprié. Ce schéma assure que le message d'urgence est transmis de manière fiable à un seul relais dans la direction de propagation désirée. En outre, afin de répondre à différentes exigences de qualité de service (QoS) dans un réseau IVC, nous utilisons l'accès à coordination distribué amélioré EDCA (enhanced distributed coordination access) basé sur les priorités de l'IEEE 802.11e MAC pour gérer les services liés à la sécurité. CLBP offre la possibilité de diffuser des messages de manière plus intelligente et plus économe en énergie dans les réseaux IVC, ce qui permet de réduire les redondances et de réduire la consommation d'énergie.

III.4.5 Protocoles à base de cluster

Les protocoles à base de cluster pour les réseaux WBAN sont conçus pour améliorer l'efficacité énergétique, la gestion des données et la robustesse des communications en regroupant les nœuds en groupes appelés clusters et un membre particulier de chaque groupe est nommé chef de groupe (cluster head CH). Chaque chef de cluster sélectionné a pour responsabilité de recueillir toutes les données collectées par chaque nœud correspondant à son cluster et de transmettre toutes les informations accumulées à la station de base ou au sink. Il a aussi la capacité de gérer les ressources du cluster et de coordonner les activités des nœuds membres.

Les protocoles basés sur les clusters permettent une gestion plus efficace de l'énergie en diminuant le nombre de transmissions directes vers la station de base et en optimisant les chemins de communication, ce qui prolonge la durée de vie du réseau WBAN. Les principaux

désavantages des protocoles de cette catégorie sont cependant le temps et la charge excessive engendrés par la formation des clusters et la sélection des CHs.

Nous examinons dans cette partie quelques protocoles de routage basés sur des clusters qui ont été proposés ces dernières années.

III.4.5.1 AnyBody

Les réseaux de capteurs corporels sans fil utilisent AnyBody [83] comme protocole d'auto-organisation. Il offre aux points de capteurs la possibilité de s'organiser de manière dynamique et autonome afin d'améliorer la communication et la gestion des ressources au sein du réseau. Il y a cinq étapes dans AnyBody. Tout d'abord, un nœud apprend avec quels autres nœuds il peut interagir (découverte du voisin). Après avoir échangé des messages hello, tous les nœuds sont informés de leurs voisins à un saut et à deux sauts. Par la suite, en se basant sur la connaissance du nœud de son voisinage à 2 sauts, il évalue sa densité. Ainsi, chaque nœud envoie un message hello indiquant sa densité, tandis que ses voisins reçoivent la densité. Les nœuds sont regroupés en clusters et les têtes de cluster sont les nœuds qui présentent la densité la plus élevée au sein du cluster. Par la suite, les clusters sont interconnectés et les chefs de cluster sont connectés virtuellement les uns aux autres grâce à des nœuds GW. Les nœuds GW sont ceux qui possèdent un voisin qui n'est pas à l'intérieur du cluster. Finalement, les voies de routage sont configurées en direction du nœud récepteur. En intégrant des mécanismes d'auto-organisation, de gestion dynamique de la topologie et d'optimisation énergétique, AnyBody répond aux défis spécifiques des WBAN, notamment la mobilité et la nécessité d'une surveillance continue et fiable des paramètres de santé.

III.4.5.2 Cluster Based Body Area Protocol

Le protocole de routage Cluster Based Body Area Protocol (CBBAP) [84] a été développé pour les réseaux de capteurs corporels sans fil. Son objectif principal est d'améliorer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie du réseau en adoptant une approche basée sur les clusters. Dans le CBBAP, le réseau était subdivisé en diverses zones qui forment des clusters. Chaque cluster est dirigé par un nœud chef de cluster (Cluster Head, CH) qui est responsable de la collecte et de l'agrégation des données des nœuds membres du cluster. Les Chefs de Cluster (CH) ont été choisis en se basant sur les nœuds voisins. Cependant, on a suggéré l'utilisation de

clusters et de chefs de cluster pour diminuer la distance de transmission et améliorer le débit du réseau et l'efficacité énergétique du réseau de capteurs, ce qui a un impact direct sur la durée de vie des nœuds du réseau.

III.4.5.3 Dual sink approach using clustering in body area network

Le DSCB [85] est un protocole élaboré dans le but d'améliorer les performances des réseaux WBAN. Deux stations de base (sinks) et un mécanisme de clustering sont utilisés afin d'améliorer la stabilité du réseau et de diminuer les délais de transmission. La principale raison pour laquelle deux sinks sont utilisés est de permettre une connexion directe aux nœuds mobiles connectés aux mains ou aux pieds. De plus, il maintient l'équilibre de la charge sur chaque sink. Les clusters sont formés en utilisant les informations fournies précédemment dans les messages Hello et Reply échangés entre les deux sinks et les autres nœuds, qui incluent leurs identifiants, leur localisation et leur énergie résiduelle. Les deux sink sont déclarés comme CH pour leurs clusters respectifs. Une fois que les données ont été détecté, chaque nœud les envoie directement au sink ou via le nœud transitaire. Pour choisir le nœud transitaire, on utilise la fonction de coût (CF). Cette valeur est déterminée pour chaque nœud voisin, en prenant en compte sa distance par rapport au sink, l'énergie résiduelle et la puissance de transmission. Une fois que le SNR et la qualité du lien ont été vérifiées, le nœud voisin dont la CF est minimale est choisi comme nœud transitaire. Grâce à ces paramètres, les ressources des nœuds sont utilisées de manière efficace afin d'améliorer les performances du réseau.

III.4.5.4 Hybrid Clustering Approach for Extending WBAN Lifetime

Afin de pallier les contraintes des protocoles de routage existants basés sur des clusters, un nouveau protocole de routage, nommé HCEL [86] est proposé. Le HCEL repose sur l'association du clustering statique qui utilise un nœud parent fixe jusqu'à ce qu'il ait épuisé son énergie, et du clustering dynamique qui utilise une sélection flexible du nœud parent. Un processus de sélection du nœud parent est proposé pour assurer un équilibre de charge entre les nœuds. Lorsque le réseau est déployé et initialisé, les nœuds capteurs sont positionnés de manière stratégique et le réseau est préparé pour les opérations futures. La sélection des nœuds parents revêt une grande importance car ils jouent un rôle essentiel en tant qu'intermédiaires pour la transmission des données des nœuds capteurs vers le sink. L'algorithme économe en énergie utilisé par HCEL

permet de choisir les nœuds parents en se basant sur l'énergie résiduelle, la proximité par rapport au sink et le RSSI (received signal strength indicator). En outre, le nœud choisi doit se conformer à des exigences, telles que le nombre de nœuds en service et la valeur seuil de l'énergie des nœuds parents candidats. Après avoir choisi les nœuds parents, la phase de transmission des données débute. Les données importantes sont envoyées directement au sink, tandis que les données ordinaires sont envoyées via les nœuds parents choisis au sink. Le protocole HCEL vise principalement à améliorer la durée de vie des nœuds capteurs, ce qui permet de diminuer la consommation d'énergie et d'améliorer les performances globales du système WBAN.

III.5 Conclusion

Les protocoles de routage dans les WBANs jouent un rôle fondamental dans l'efficacité et la fiabilité des réseaux de capteurs corporels. Au cours de ce chapitre, nous avons exposé de manière générale le routage dans les WBANs, en abordant les défis et les obstacles auxquels un protocole de routage doit faire face. Chacun des protocoles traite de manière différente des défis liés aux WBANs, en prenant en considération les contraintes énergétiques, les exigences de latence et les conditions thermiques. Ces protocoles sont répartis en différentes catégories : à base de température, à base de qualité de service, à base de posture, à base de cross layer et à base de cluster. Nous avons expliqué le principe de chaque catégorie tout en mettant en évidence les caractéristiques des protocoles les plus répandus de chaque catégorie, qui visent à relever certains défis rencontrés par les WBANs. Il est crucial de comprendre et d'améliorer ces protocoles afin de développer des systèmes de santé plus solides et fiables, capables de fournir des soins en temps réel et de haute qualité. Dans le chapitre suivant, une solution innovante et économe en énergie sera proposée pour améliorer le fonctionnement des réseaux WBANs et pour répondre aux exigences des applications de santé modernes.

Chapitre IV (Contributions) : Protocoles de routage à base de cluster et de chaine

IV.1 Introduction

L'une des limitations les plus importantes du réseau corporel sans fil (WBAN) est l'exigence d'une faible consommation d'énergie, due à la nature des dispositifs portés par l'utilisateur, qui sont souvent de petite taille et alimentés par des batteries de capacité limitée. Cette contrainte énergétique est exacerbée par le besoin constant de surveiller et de transmettre des données médicales en temps réel, ce qui exige des transmissions fréquentes et fiables. Afin de prolonger la durée de vie des dispositifs tout en maintenant la qualité du service (QoS), plusieurs techniques et protocoles de routage ont été mis au point. Ces approches visent non seulement à minimiser la consommation d'énergie pendant les processus de communication, mais aussi à optimiser le chemin de routage en tenant compte des caractéristiques spécifiques du corps humain, telles que les interférences causées par les mouvements ou les variations de la topologie du réseau.

Ce chapitre présente deux contributions qui reposent sur deux méthodes de routage qui ont pour objectif de prolonger la durée de vie du WBAN. Nous exposons comment chaque méthode a été mise en place, ainsi que les étapes suivies lors de la simulation, et nous abordons les résultats de simulation obtenus.

IV.2 Contribution 1 : Algorithme d'élection des chefs de cluster basé sur la logique floue pour améliorer la durée de vie du WBAN

IV.2.1 Présentation de l'algorithme

Dans cette contribution, nous utilisons l'outil Matlab pour étudier et analyser un protocole de routage basé sur le clustering, que nous appelons « CHSFL » (Cluster Head Selection algorithm based on Fuzzy Logic), afin d'évaluer les performances des réseaux WBAN qui l'appliquent. Nous poursuivons avec une comparaison des performances WBAN (durée de vie, stabilité, efficacité énergétique) obtenues par ce protocole et sa version améliorée « Improved CHSFL ».

Différentes études ont été menées afin de gérer le routage des réseaux WBAN. Certains travaux sont exposés brièvement ci-dessous. Afsana et al. [87], ont étudié la nanotechnologie et la communication en bande Téra hertz pour développer un système de transfert économe en énergie basé sur des clusters. Ce système est conçu pour améliorer les performances des réseaux WBAN afin de faciliter les soins de santé et la vie des patients. Khan et al. [88] ont proposé un réseau fiable et efficace en termes de consommation énergétique pour les WBASN. Ils ont utilisé le

routage multi-sauts pour réduire la distance de transfert de données et économiser la consommation d'énergie. Dans la référence [89], le modèle de perte de trajet IEEE 802.15.6 CM3A entre nœuds de communication et le coefficient de réflexion (S11) d'une antenne placée sur le corps sont utilisés par les auteurs pour calculer la localisation optimale du nœud central dans un WBAN tout en évaluant les mesures de qualité des liens telles que SNR, BER et RSSI. Le protocole E-HARP, introduit par Ullah et al. [90], suggèrent une nouvelle méthode de routage coopératif et de sélection dynamique de tête de cluster (CH) basée sur un certain nombre de paramètres. Cette méthode se décompose en deux étapes. La première consiste à choisir la meilleure tête de cluster (CH) en calculant le facteur de coût (CF) à partir de l'énergie résiduelle du nœud capteur, de la puissance de transmission nécessaire, du rapport signal/bruit (SNR) de la liaison de communication et de la perte d'énergie globale du réseau. Dans la deuxième étape, les nœuds capteurs travaillent ensemble pour acheminer les données, empêchant ainsi la transmission redondante de paquets de données et économisant l'énergie des nœuds.

Ces algorithmes (CHSFL et Improved CHSFL) sont proposés pour la sélection de la tête de cluster en tenant compte de l'énergie résiduelle du nœud capteur et de sa distance par rapport au puits pour un routage économe en énergie dans les WBAN. De plus, le modèle de réseau et le modèle énergétique, qui sont utilisés pour montrer dans quelle mesure le schéma suggéré fonctionne, sont décrits dans les sous-sections qui suivent. Un modèle est proposé qui maximise la durée de vie du réseau, l'énergie résiduelle et la consommation globale d'énergie.

IV.2.1.1 Topologie et modèle du réseau

Nous avons proposé un environnement d'ambulance intelligente pour la communication WBAN niveau 1. Dans l'ambulance, le système WBAN sera composé de quatorze nœuds biocapteurs et de deux puits (puits 1 et puits 2). Ce modèle a été proposé par ZAHID ULLAH et al dans [10].

Dans ce travail, nous considérerons que :

- Après le déploiement, tous les nœuds sont immobiles. De plus, des informations cruciales sur eux-mêmes, comme leur emplacement actuel et l'énergie restante, leur sont également connues.
- Chaque nœud a la même capacité de calcul et de détection.

- À chaque tour, un seul nœud est choisi comme chef de cluster dans chacun des clusters pour superviser et organiser les transmissions des nœuds membres et les envoyer vers les récepteurs.

IV.2.1.2 Modèle énergétique

L'étude proposée estime l'énergie utilisée par un nœud lors de la transmission de données à l'aide d'un modèle radio de premier ordre [5-7].

Le modèle radio de premier ordre estime que la consommation d'énergie de transmission des nœuds pour relayer un paquet de données (nombre de bits W) à une distance « D » peut être calculée comme suit :

$$ETX(W, D) = ETX-elect * W + EAmp * \eta * Di * W \quad (1)$$

Voici comment le même modèle prend en compte la consommation d'énergie des nœuds lors de la réception d'un paquet de données contenant des bits « W » :

$$ERX(W) = ERX-elect * W \quad (2)$$

En utilisant le même modèle, l'énergie des nœuds consommée pour l'agrégation du nombre de bits « W » peut être prise en compte de la manière suivante :

$$EDA(W) = EDA * W \quad (3)$$

Ici, $E_{TX-elect}$, $E_{RX-elect}$, et E_{Amp} désignent respectivement la consommation d'énergie par bit dans les circuits émetteur, récepteur et amplificateur du nœud de fonctionnement. E_{DA} indique la consommation d'énergie de l'agrégation de données par bit. Une perte de trajet supplémentaire présentée sur les canaux de communication du corps humain est représentée par l'indice de perte de trajet.

Les pertes d'énergie du traitement des nœuds ne sont pas prises en compte dans la méthode suggérée car elles sont mineures par rapport au transfert de données [92].

IV.2.1.3 Implémentation expérimentale

L'algorithme proposé est composé de trois phases :

- Constitution de clusters,

- Sélection des Head Clusters (CH),
- Routage des informations vers le nœud récepteur.

La première phase consiste à regrouper tous les nœuds dans un nombre prédéfini de clusters : 2 clusters dans ce cas. Cette tâche est réalisée par l'algorithme "Fuzzy C-Means". Fuzzy C-means (FCM) est une technique de regroupement de données dans laquelle un ensemble de données est regroupé en N clusters [93]. La distance entre le centre de chaque cluster et les différents points de données constitue la base de l'analyse effectuée par l'algorithme FCM. Plus précisément, un point de données proche du centre d'un cluster aura un degré élevé d'appartenance à ce cluster, tandis qu'un point de données plus éloigné d'un centre de cluster aura un faible degré d'appartenance [93], [94].

Une fois les clusters constitués, on passe à la sélection des CH. Pour cela, nous avons utilisé un système d'inférence floue de type Mamdani (voir Figure IV.1), admettant en entrée deux variables linguistiques qui sont le niveau d'énergie résiduelle du nœud et sa distance par rapport au sink1. Ce système a une seule variable de sortie nommée « probabilité d'élection du chef de cluster PCHE».

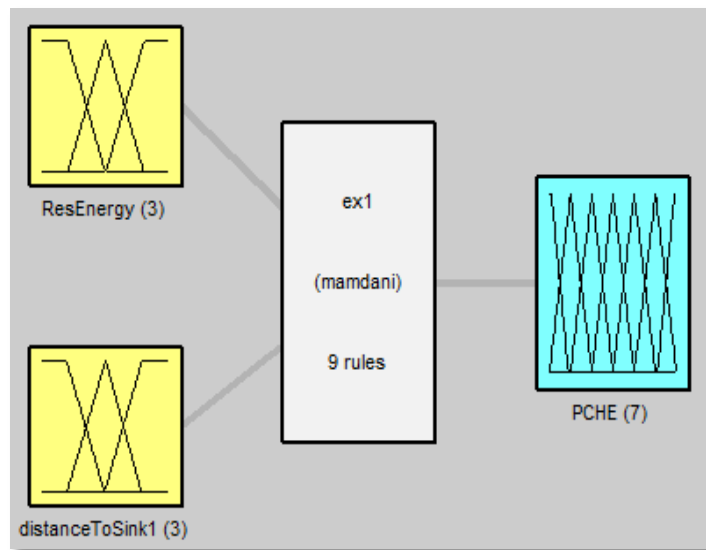


Figure IV.1. Système d'inférence floue de type MAMDANI

Un système d'inférence floue de type Mamdani utilise des ensembles flous comme règle de conséquence [95], [96], il se compose de quatre étapes :

- Fuzzification : Elle convertit les valeurs réelles en valeurs floues (linguistiques) à partir des fonctions d'appartenance de chacun des sous-ensembles flous (sous forme de courbe).
- Évaluation des règles : Les systèmes de logique floue utilisent l'expérience exprimée sous la forme d'une base de règles "Si – Alors".
- Inférence : Elle consiste à utiliser un moteur d'inférence qui déduira des valeurs de sortie floues à partir de valeurs d'entrée floues et de règles d'inférence (commande) utilisées à partir d'une base de règles.
- Defuzzification : Elle convertit les valeurs floues en valeurs réelles.

La variable linguistique « énergie résiduelle » est représentée par trois fonctions d'appartenance (voir Figure IV.2) deux de type trapézoïdal nommées « Low » et « High » et une de type triangulaire nommée « Medium » dont l'axe des abscisses représente l'univers du discours allant de 0 à 0.5, étant 0.5 est l'énergie initiale de chaque nœud.

La variable linguistique « distance par rapport au sink1 » est également représentée par trois fonctions d'appartenance (voir Figure IV.3), deux de type trapézoïdal nommées « Close » et « Far » et une de type triangulaire nommée « Adequate » dont l'axe des abscisses représente l'univers du discours allant de 0 à 1.0212, étant 1.0212 est la distance maximale séparant deux nœuds.

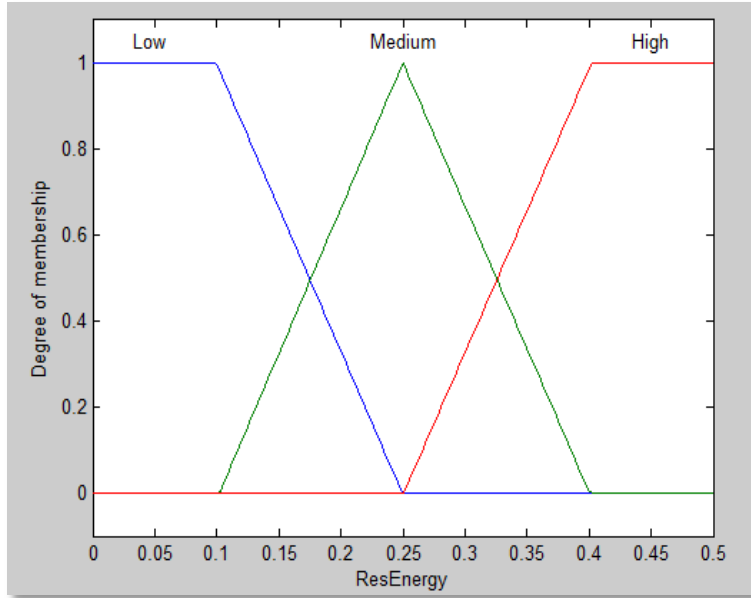


Figure IV.2. Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée « énergie résiduelle ».

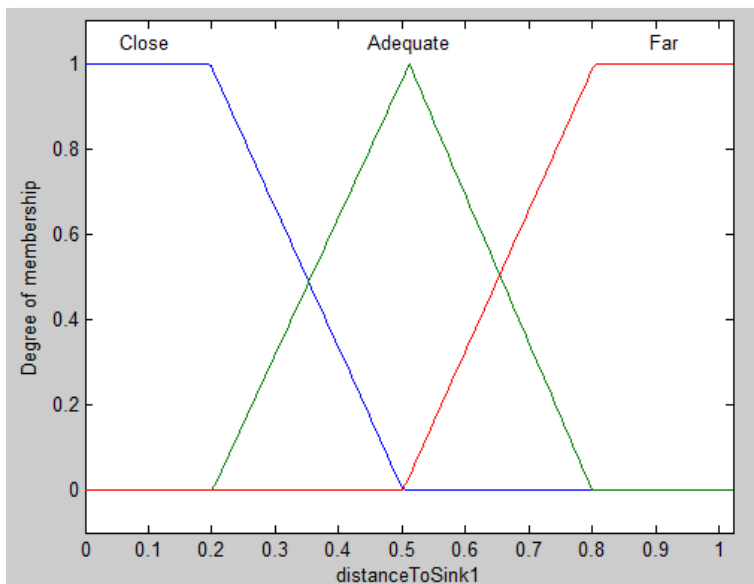


Figure IV.3. Fonctions d'appartenance à la variable d'entrée « distance par rapport au sink1 ».

La variable linguistique « Probabilité d'élection du chef de cluster » est quant à elle représentée par sept fonctions d'appartenance (voir Figure IV.4) deux de type trapézoïdal nommées « very small » et « very large » et cinq de type triangulaire nommées « small », « rather small », «

medium », « rather large » et « large » dont l'axe des abscisses représente l'univers du discours allant de 0 à 1, étant 1 est la probabilité maximale.

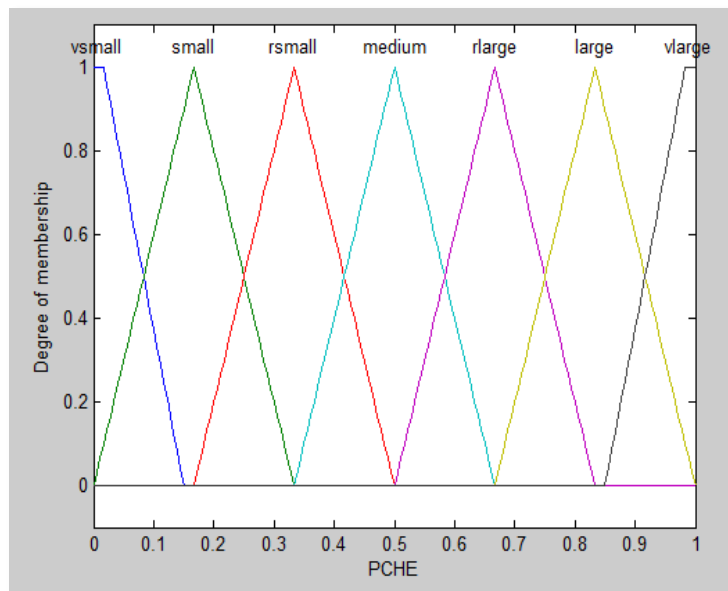


Figure IV.4. Fonctions d'appartenance à la variable de sortie «PCHE».

Les règles régissant le système flou sont données comme suit :

Règle 1 : Si (ResEnergy est Low) et (distanceToSink1 est Close) alors (PCHE est small).

Règle 2 : Si (ResEnergy est Low) et (distanceToSink1 est Adequate) alors (PCHE est rsmall).

Règle 3 : Si (ResEnergy est Low) et (distanceToSink1 est Far) alors (PCHE est vsmall).

Règle 4 : Si (ResEnergy est Medium) et (distanceToSink1 est Close) alors (PCHE est rlarge).

Règle 5 : Si (ResEnergy est Medium) et (distanceToSink1 est Adequate) alors (PCHE est medium).

Règle 6 : Si (ResEnergy est Medium) et (distanceToSink1 est Far) alors (PCHE est small).

Règle 7 : Si (ResEnergy est High) et (distanceToSink1 est Close) alors (PCHE est vlarge).

Règle 8 : Si (ResEnergy est High) et (distanceToSink1 est Adequate) alors (PCHE est large).

Règle 9 : Si (ResEnergy est High) et (distanceToSink1 est Far) alors (PCHE est rlarge).

Après la sélection des deux chefs de cluster, ils seront responsables de la collecte des données de chaque nœud membre, de l'agrégation des données et de la transmission des données collectées au sink. Les chefs de cluster sont élus après chaque tour.

IV.2.2 Simulation

L'évaluation de notre algorithme est réalisée à l'aide d'un modèle de simulation sous Matlab. Deux sinks et quatorze nœuds capteurs composent le modèle ; on suppose que chaque nœud restera au même emplacement pendant toute la durée de la simulation.

Le tableau IV.1 fournit un résumé des paramètres de simulation que nous avons utilisés dans notre modèle de simulation.

Nous proposerons deux variantes (solutions) :

- **Dans la première**, nous proposons un algorithme de sélection de tête de cluster basé sur la logique floue (CHSFL) où tous les nœuds seront affectés par le clustering, c'est à dire que les 14 nœuds seront affectés par le mécanisme de clustering et 2 clusters seront formés (voir Figure IV.5).
- **Dans la seconde**, nous proposons une amélioration de l'algorithme précédent nommé "Improved-CHSFL" où l'on privera les nœuds proches des puits de l'opération de clustering, c'est à dire que les nœuds 11, 12, 13 et 14 ne seront pas affectés par le mécanisme de clustering et les 2 clusters seront formés à partir de nœuds 1 à 10 (voir Figure IV.6).

Tableau IV.1. Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Énergie initiale	0,5 J
Énergie de transmission	16,7 nJ/bit
Énergie de réception	36,1 nJ/bit
Énergie d'amplification	1,98 nJ/bit
Énergie d'agrégation des données	5 nJ
Taille du paquet	3000 bits
Nombre maximum de tours	3500
Nombre de nœuds	14
Nombre de CH	2

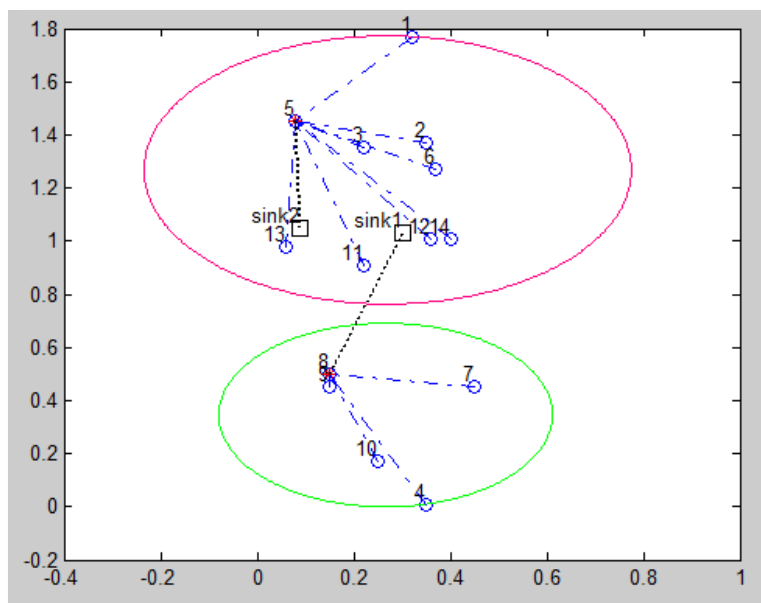


Figure IV.5. Topologie du réseau (CHSFL).

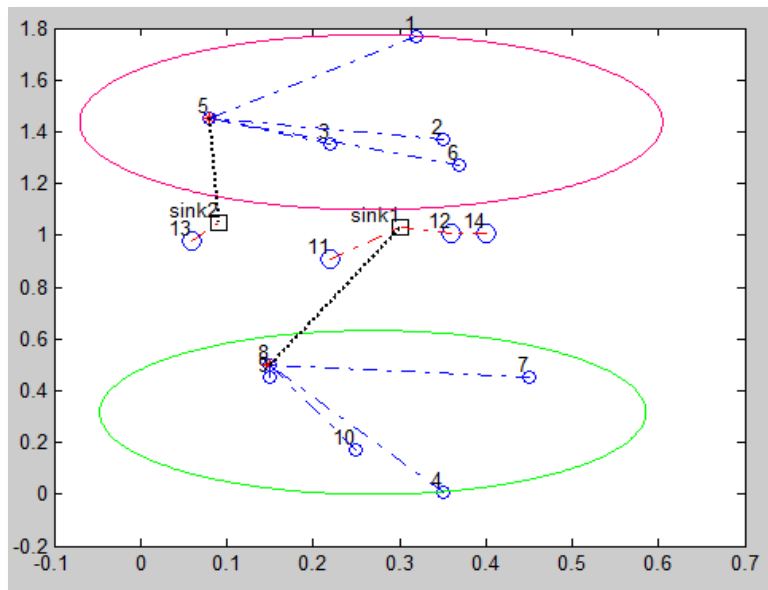


Figure IV.6. Topologie du réseau (Improved- CHSFL)

IV.2.3 Résultats et discussion

L'analyse des graphes de consommation d'énergie de nos deux algorithmes, CHSFL et I-CHSFL, constitue la première étape d'évaluation. Au fur et à mesure que la simulation se poursuit, nous prenons des mesures de l'énergie restante pour chaque tour.

La figure IV.7 représente la consommation d'énergie des deux algorithmes, où l'on peut voir que CHSFL utilise toute l'énergie du réseau après 320 tours, mais I-CHSFL utilise toutes les réserves d'énergie du réseau après 935 tours. Ainsi, nous constatons qu'I-CHSFL prolonge la durée de vie du réseau d'environ 34 % par rapport à CHSFL.

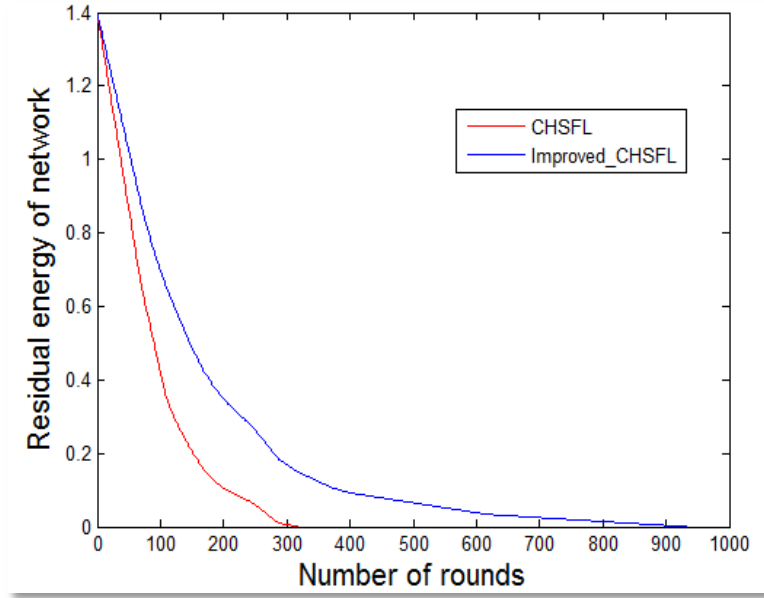


Figure IV.7. Énergie résiduelle consommée par les deux algorithmes.

La deuxième étape d'évaluation consiste à analyser le nombre de nœuds vivants lors de la simulation, pour ce faire, nous avons compté le nombre de nœuds actifs pour chaque tour de simulation. D'après la figure IV.8, on remarque qu'après 320 tours tous les nœuds sont morts dans CHSFL alors qu'il y a environ 5 nœuds vivants dans I-CHSFL.

La figure IV.9 montre un histogramme qui illustre le premier nœud mort (FND) et le dernier nœud mort (LND) pour les deux algorithmes. Selon cette figure, la première mort du nœud s'est produite après 65 tours en CHSFL et après 105 tours en I-CHSFL et la dernière mort du nœud s'est produite après 320 tours en CHSFL et après 935 tours en I-CHSFL. Ce résultat confirme qu'I-CHSFL retarde la mort des nœuds par rapport au CHSFL.

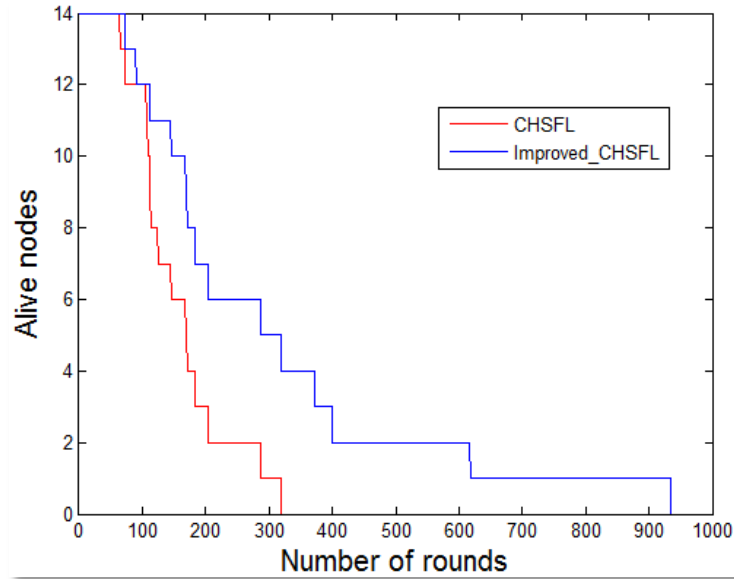


Figure IV.8. Nombre de nœuds vivants pour les deux algorithmes.

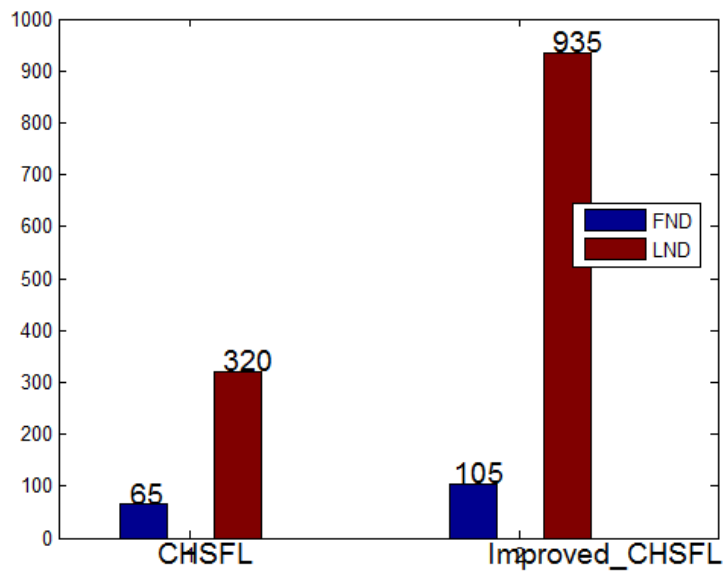


Figure IV.9. First Node Dead and Last Node Dead

La figure IV.10 et la figure IV.11 représentent le nombre de transmissions par nœud pour chacun des deux algorithmes. Selon ces figures, les transmissions de la plupart des nœuds sont élevées en utilisant I-CHSFL (900 transmissions pour les nœuds privés de clustering et 300 à 900

transmissions pour les nœuds 5, 7, 8 et 9). De ce résultat, on peut en déduire que l'I-CHSFL augmente la durée de vie du réseau et le nombre de transmissions par nœud.

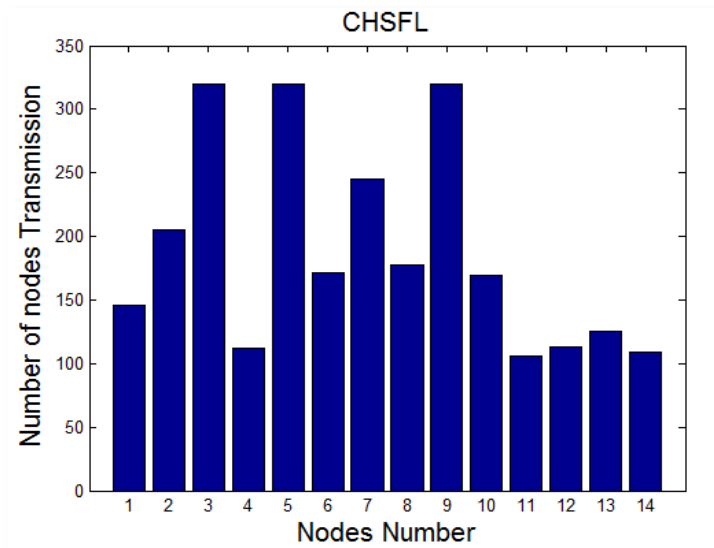


Figure IV.10. Nombre de transmissions par nœud (CHSFL).

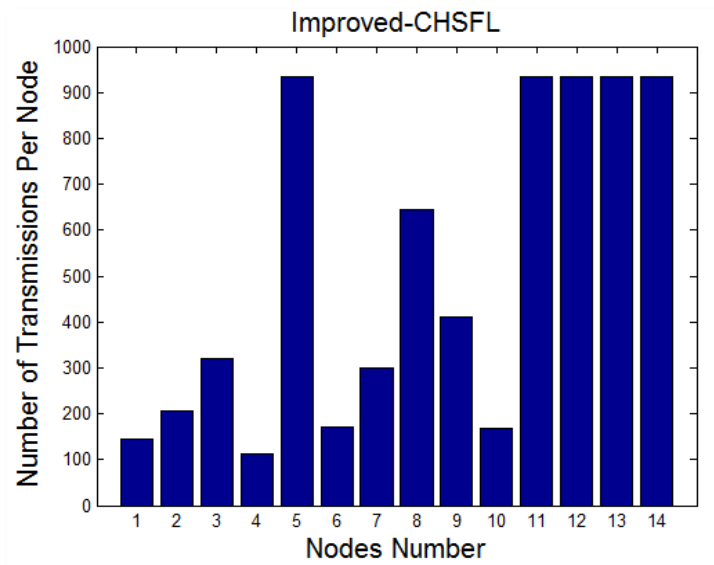


Figure IV.11. Nombre de transmissions par nœud (Improved-CHSFL).

IV.3 Contribution 2 : Approche de routage à base de chaîne pour améliorer la durée de vie des réseaux corporels sans fil

IV.3.1 Présentation de l'approche

Dans cette contribution, nous proposons trois approches basées sur la formation d'une chaîne utilisant une matrice de distances. La première approche repose sur la constitution d'une chaîne unique utilisant les distances les plus courtes. La deuxième et la troisième consistent à changer la position du sink en formant un seul cluster grâce à la méthode FCM et le centre de ce dernier constitue la nouvelle position du puits.

Différentes actions ont été entrepris pour améliorer le routage dans les réseaux WBAN. Dans ce qui suit, nous allons mentionner quelques-uns de ces travaux.

Wu et al. [97] ont proposé un algorithme amélioré de routage hiérarchique de clustering basé sur une chaîne (ICCHR pour improved chain-based clustering hierarchical routing) en s'inspirant de l'algorithme LEACH. Ce protocole évite le problème de la mort trop rapide des nœuds internes en faisant en sorte que les nœuds chefs de cluster (CH) envoient des signaux à la station de base (BS) indirectement via l'utilisation de la technique de chaîne plutôt que directement à la BS. Les résultats de cette étude peuvent servir de guide pour la mise en réseau WSN dans un environnement de verger complexe. Rani et al. [98] ont proposé un protocole nommé E-CBCCP (energy efficient chain based routing protocol for underwater wireless sensor networks). Dans ce protocole, l'énergie des chefs de cluster, des nœuds relais (RN) et des coordinateurs de cluster (CCO) a été prise en compte dans ce protocole lors de la transmission des données et après un laps de temps prédéterminé, les rôles des CH, CCO et RN sont modifiés pour préserver la charge sur les nœuds. Pour transférer des données des SN vers les CH, les RN sont choisis à l'aide d'une méthode indépendante de l'emplacement utilisant le comptage saut à saut. Les simulations MATLAB prennent en charge la méthodologie qui a réduit les coûts de communication des nœuds capteurs et ainsi augmenté la durée de vie du réseau. Les recherches [99], [100] ont étudié un système de routage économe en énergie pour les WBAN hétérogènes basé sur la technique d'optimisation par essaim de particules. En utilisant une technique d'optimisation par essaim de particules pour optimiser l'énergie résiduelle et la distance, le protocole proposé sélectionne le nœud relais entre les nœuds sources et le puits et transmet les paquets de données de manière multi-sauts. Les résultats des expériences démontrent que le protocole suggéré équilibre

parfaitement l'efficacité énergétique du WBAN et la réduction du nombre de nœuds relais. Ahmad et al. [101] introduisent RE-ATTEMPT, un protocole multi-sauts économe en énergie et ignorant la chaleur pour les WBAN qui est basé sur un seuil adaptatif à fiabilité améliorée. Un déploiement statique de capteurs sans fil positionnés en fonction des niveaux d'énergie constitue la base du protocole de routage suggéré. Alors que les données de routine utilisent une transmission multi-sauts, les données d'urgence sont fournies directement. Pour réduire le facteur de retard, le protocole RE-ATTEMPT choisit la route avec le moins de sauts possibles. Pour maximiser la durée de vie du réseau, un modèle de programmation linéaire est utilisé et des simulations MATLAB sont exécutées pour prédire la perte de chemin. Les résultats de la simulation montrent qu'en termes de débit, de perte de paquets et de longévité du réseau, le protocole proposé surpasse le protocole ATTEMPT.

L'approche proposée est basée sur la formation d'une chaîne de nœuds capteurs utilisant une matrice de distance pour un routage économe en énergie dans les WBAN. De plus, le modèle de réseau et le modèle énergétique, qui sont utilisés pour montrer dans quelle mesure le schéma suggéré fonctionne, sont décrits dans les sous-sections qui suivent. L'efficacité du réseau en termes de débit, d'énergie résiduelle et de durée de vie du réseau est optimisée par le modèle proposé.

IV.3.1.1 Topologie et modèle du réseau

Un environnement d'ambulance intelligente pour la communication WBAN niveau 1 est présenté dans cet article. Le système WBAN de l'ambulance comprendra un puits et huit nœuds biocapteurs. Bilandi et al. [99] ont introduit ce concept. Dans ce travail, nous considérerons que:

- Après le déploiement, tous les nœuds sont immobiles sauf le récepteur. De plus, ils sont conscients de détails vitaux les concernant, tels que leur position actuelle et l'énergie restante.
- Chaque nœud a la même capacité de calcul et de détection.

IV.3.1.2 Modèle énergétique

Dans le but d'estimer l'énergie des nœuds utilisée dans la transmission de données, le travail proposé utilise le même modèle énergétique utilisé dans la première contribution.

IV.3.2 Simulation et évaluation

Dans ce travail, nous proposons trois approches basées sur la formation d'une chaîne de nœuds capteurs utilisant la matrice de distance suivante (la valeur 99.0000 est écrite pour éviter d'avoir un zéro à la diagonale). La première approche repose sur la constitution d'une chaîne unique utilisant les distances les plus courtes. La deuxième et la troisième consistent à changer la position du sink en formant un seul cluster grâce à la méthode FCM et le centre de ce cluster constitue la nouvelle position du sink.

$$d = \begin{bmatrix} 99.0000 & 0.3000 & 0.8443 & 0.7533 & 0.5590 & 0.5025 & 0.8757 & 0.2236 & 0.1803 \\ 0.3000 & 99.0000 & 0.8006 & 0.7845 & 0.5025 & 0.5590 & 0.8927 & 0.1414 & 0.1803 \\ 0.8443 & 0.8006 & 99.0000 & 0.2062 & 0.3007 & 0.3720 & 0.1838 & 0.7035 & 0.9080 \\ 0.7533 & 0.7845 & 0.2062 & 99.0000 & 0.3081 & 0.2508 & 0.1237 & 0.6629 & 0.8538 \\ 0.5590 & 0.5025 & 0.3007 & 0.3081 & 99.0000 & 0.2000 & 0.3992 & 0.4031 & 0.6083 \\ 0.5025 & 0.5590 & 0.3720 & 0.2508 & 0.2000 & 99.0000 & 0.3734 & 0.4272 & 0.6083 \\ 0.8757 & 0.8927 & 0.1838 & 0.1237 & 0.3992 & 0.3734 & 99.0000 & 0.7765 & 0.9713 \\ 0.2236 & 0.1414 & 0.7035 & 0.6629 & 0.4031 & 0.4272 & 0.7765 & 99.0000 & 0.2062 \\ 0.1803 & 0.1803 & 0.9080 & 0.8538 & 0.6083 & 0.6083 & 0.9713 & 0.2062 & 99.0000 \end{bmatrix}$$

L'évaluation de notre algorithme est réalisée à l'aide d'un modèle de simulation sous MATLAB. Le modèle est composé de 8 nœuds de capteurs et 1 puits. À l'exception du puits, on suppose que chaque nœud reste au même endroit pendant la simulation. Les paramètres de simulation utilisés ont été les mêmes que ceux présentés dans le tableau IV.1. Le processus de notre algorithme est le suivant :

- Choix de la position du puits en formant un cluster selon la méthode FCM.
- Une matrice de distance a été calculée pour tous les nœuds du réseau, y compris le sink.
- Si une distance est égale à 0, soit la distance d'un nœud à lui-même, on remplace cette distance par une valeur par exemple égale à 99.
- Dans chaque ligne de la matrice, on extrait la position de la valeur minimale à l'aide des indices (index de ligne, index de colonne). Ce couple indique le lien entre le nœud représenté par la ligne et celui représenté par la colonne.
- Ainsi, nous formons les chemins les plus courts entre les nœuds menant au puits.

Ces trois approches sont considérées pour la construction d'une chaîne de 8 capteurs avec 1 sink au sein d'un WBAN. Dans la première approche, le sink reste stationnaire (voir Figure IV.12), conservant ainsi sa position initiale tout au long de l'exploitation du réseau. Le sink est à mi-chemin entre les nœuds 1 et 2 mais le nœud 2 est plus proche du nœud 8. Les figures IV.13 et IV.14 représentent respectivement l'énergie résiduelle et le nombre de nœuds vivants de la première approche, où l'on peut remarquer que l'ordre des nœuds morts est le suivant : nœud 5 (tour 6812), nœud 4 (tour 6874), nœud 6 (tour 6887), nœud 2 (tour 6893), nœud 8 (tour 6900), nœud 7 (tour 6902), nœud 3 (tour 8873) et nœud 1 (tour 8948).

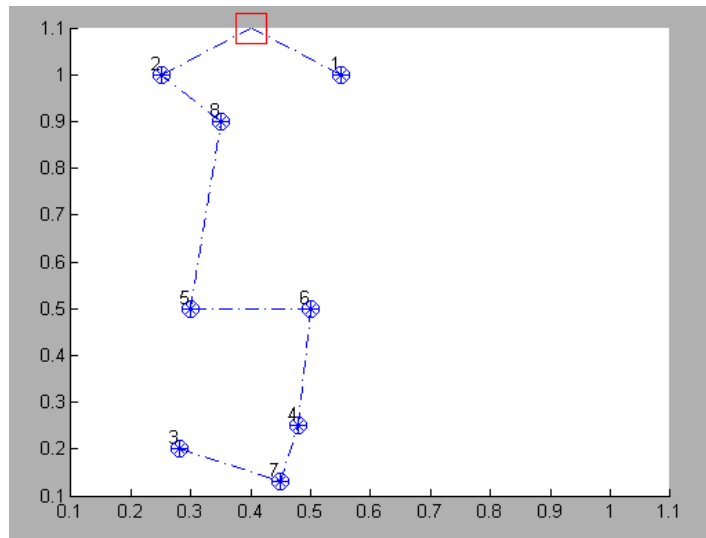


Figure IV.12. Construction en chaîne sans déplacer le sink.

La deuxième approche introduit une dimension de mobilité en déplaçant le sink vers une position spécifique, précisément aux coordonnées $x=0.3$ et $y=0.7$ (voir Figure IV.15). Cette mobilité du puits peut être exploitée pour optimiser la collecte de données dans des zones spécifiques du corps. Ainsi, améliorant la qualité des mesures et permettant un suivi ciblé des paramètres vitaux. Les figures IV.16 et IV.17 représentent respectivement l'énergie résiduelle et le nombre de nœuds vivants de la deuxième approche. Où l'on peut remarquer que l'ordre des nœuds morts est le suivant : nœud 4 (tour 6874), nœud 1 (tour 6882), nœud 8 (tour 6886), nœuds 5 et 6 (tour 6888), nœud 2 (tour 6900), nœud 7 (tour 6903) et nœud 3 (tour 8896).

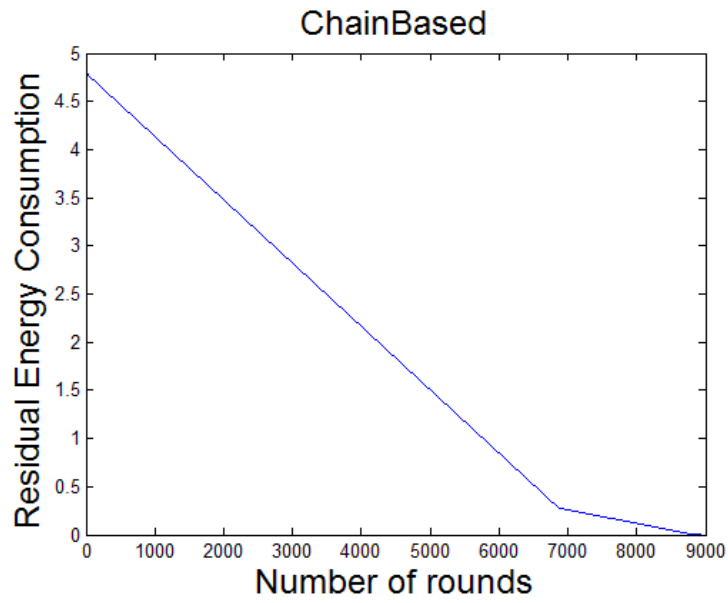


Figure IV.13. Énergie résiduelle de la 1ère approche.

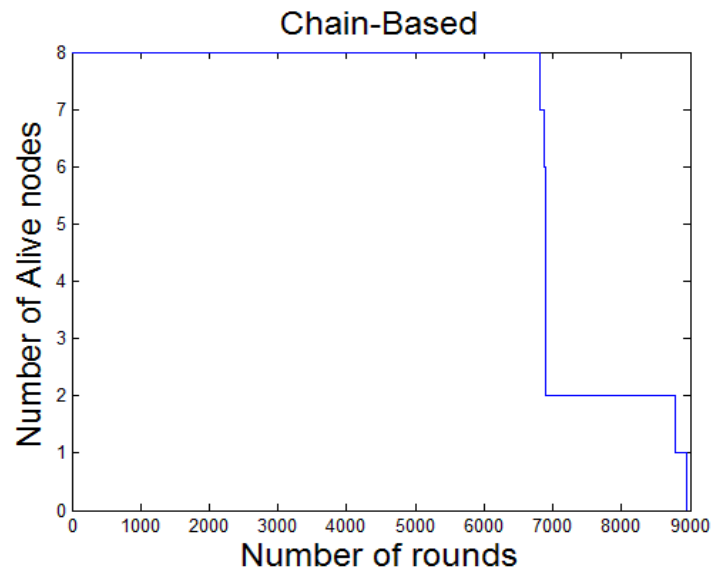


Figure IV.14. Nombre de nœuds vivants de la 1ère approche.

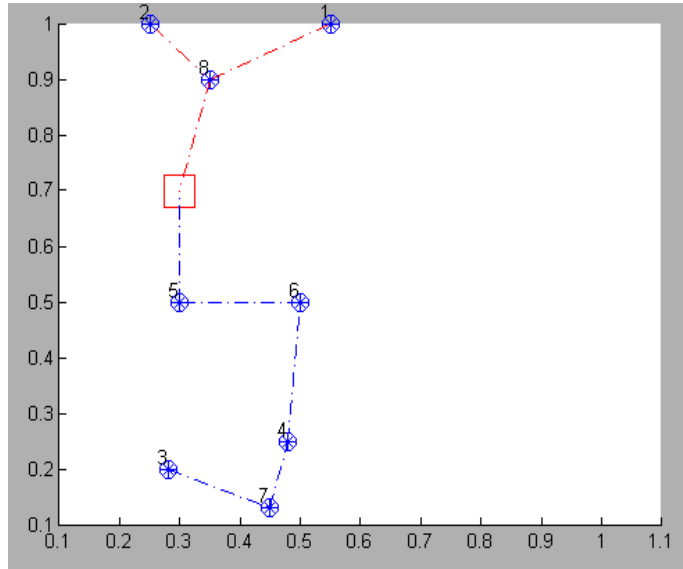


Figure IV.15. Construction de la chaîne en déplaçant le sink vers (0.3, 0.7).

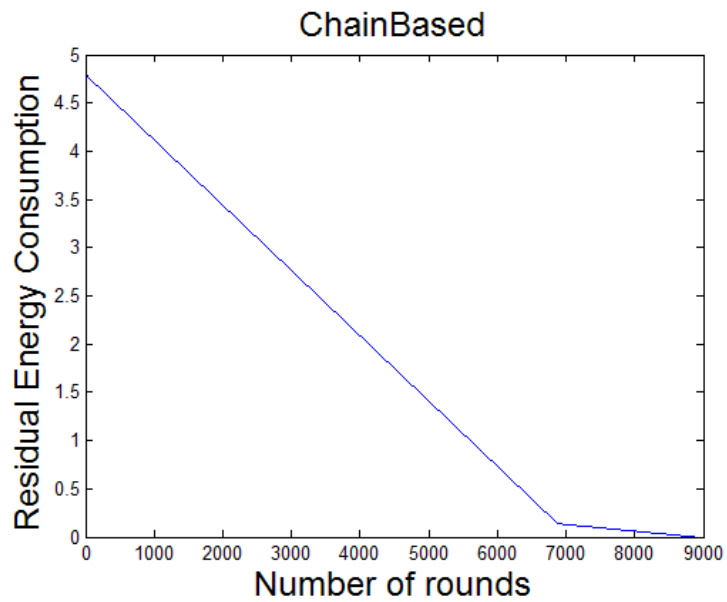


Figure IV.16. Énergie résiduelle de la 2ème approche.

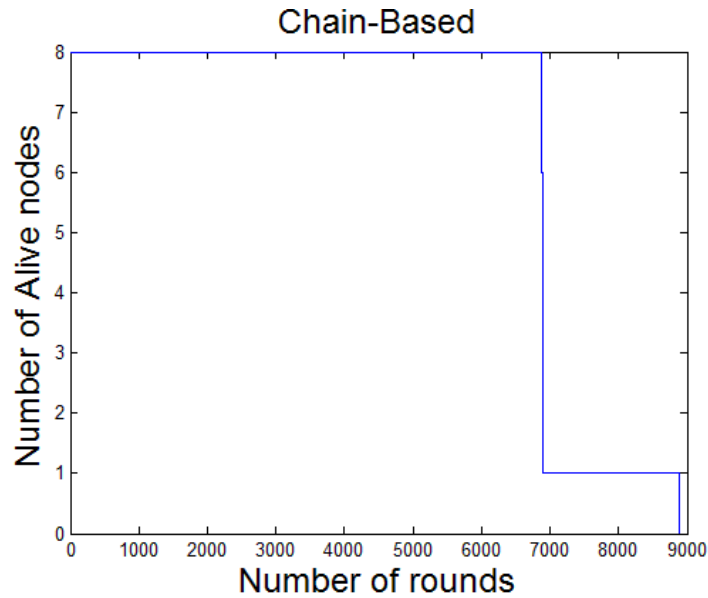


Figure IV.17. Nombre de nœuds vivants de la 2ème approche.

La troisième approche va plus loin en déplaçant le sink vers une position différente, aux coordonnées $x=0.4$ et $y=0.7$ (voir Figure IV.18). Ce changement de position du sink offre de nouvelles perspectives en termes de consommation d'énergie résiduelle, de durée de vie du réseau et de débit. Nous avons effectué une comparaison entre les trois approches et deux protocoles de routage déjà existants, à savoir RE-ATTEMPT et un nouveau protocole basé sur l'optimisation d'essaim de particules pour les réseaux corporels sans fil (PSOBAN). Nos observations ont révélé que la troisième approche démontre des résultats prometteurs en termes d'énergie résiduelle, de durée de vie du réseau et de débit.

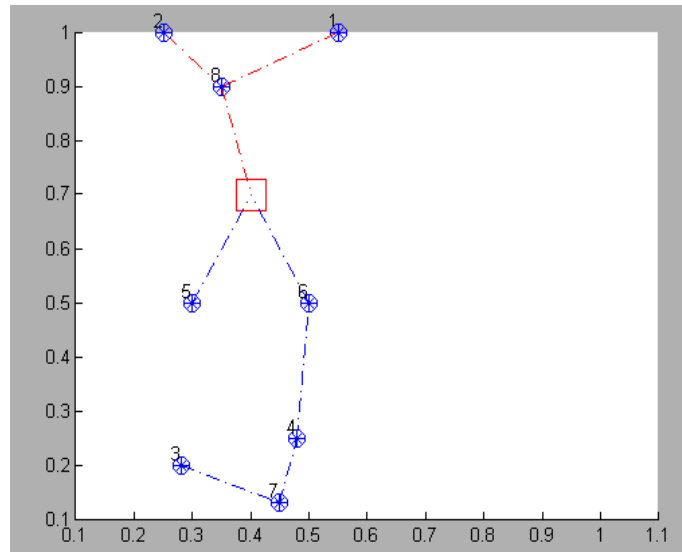


Figure IV.18. Construction de la chaîne en déplaçant le sink vers (0.4, 0.7).

IV.3.3 Étude comparative

Comme mentionné précédemment, nous comparerons notre troisième approche, qui repose sur une chaîne de capteurs, avec les protocoles de routage PSOBAN [99], [100] et RE-ATTEMPT [101]. Les sous-sections suivantes identifient les indicateurs de performance clés qui seront utilisés dans la comparaison. Le tableau IV.2 représente une analyse comparative du PROPOSED 3 et de ses concurrents en termes d'énergie résiduelle, de premier nœud mort (FND), de dernier nœud mort (LND) et de débit.

Tableau IV.2. Analyse comparative du PROPOSED 3 et de ses concurrents en termes de divers paramètres.

Parameters	Protocols				
	RE-ATTEMPT	PSOBAN	PROPOSED1	PROPOSED2	PROPOSED3
First Node Died (rounds)	2480	3800	6836	6874	6836
Last Node Died (rounds)	8912	8995	8948	8896	8930
Throughput (Packets Received)	21523	30900	30189	29829	37001
Residual Energy (J)					
At 2000 rounds	2.6894	3.3661	3.4849	3.4464	3.4861
At 4000 rounds	1.6029	2.2095	2.1698	2.0928	2.1722
At 6000 rounds	0.9041	1.2652	0.8547	0.7392	0.8583
At 8000 rounds	0.3359	0.3990	0.1202	0.0616	0.1239

IV.3.3.1 Période de stabilité

La première étape d'évaluation consiste à analyser le nombre de nœuds morts lors de la simulation. D'après la Figure IV.19, nous remarquons que pour PSOBAN [99], [100] et RE-ATTEMPT [101], le premier nœud meurt après une période de temps spécifique. En revanche, dans le cas de PROPOSED3, ce même nœud meurt après une période de temps différente et considérablement plus tard que celle de RE-ATTEMPT et PSOBAN. En conséquence, nous pouvons conclure que la troisième méthode (PROPOSED3) a une durée de stabilité plus longue que RE-ATTENT et PSOBAN.

IV.3.3.2 Énergie résiduelle

La deuxième étape de l'évaluation consiste à analyser la consommation énergétique. Nous avons mesuré l'énergie résiduelle pour chaque tour au fur et à mesure de la progression de la simulation. Les résultats de simulation présentés dans la figure IV.20 démontrent que PROPOSED 3 conserve les réserves d'énergie pendant la période de stabilité, permettant une transmission accrue des paquets de données vers le récepteur. Cela met en évidence l'efficacité énergétique de

PROPOSED 3 pendant cette période, en comparaison avec les protocoles PSOBAN [99], [100] et RE-ATTEMPT [101].

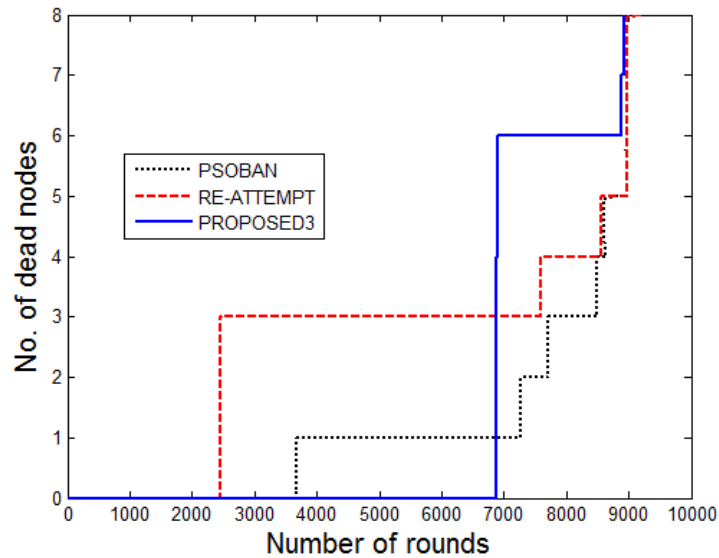


Figure IV.19. Nombre de nœuds morts vs. Nombre de tours.

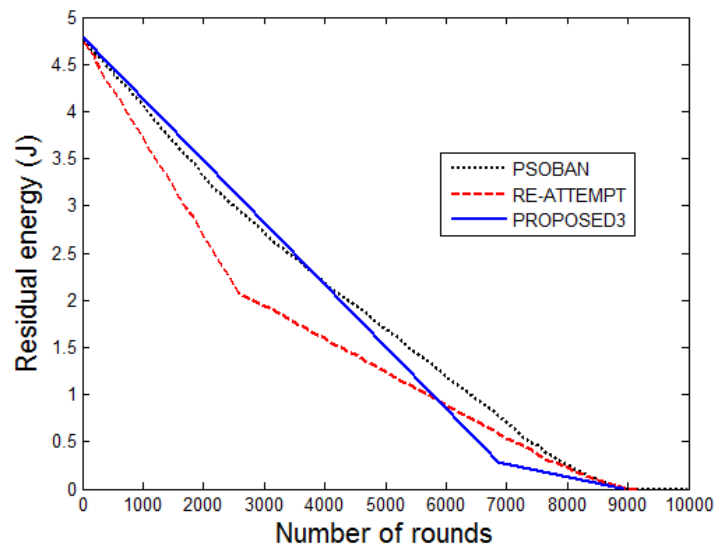


Figure IV.20. Énergie résiduelle vs. Nombre de tours.

IV.3.3.3 Débit

Les résultats de la simulation, qui sont clairement affichés dans le tableau IV.2, montrent que PROPOSED3 fonctionne admirablement par rapport à ses rivaux PSOBAN [99], [100] et RE-

ATTEMPT [101]. Alors que RE-ATTEMPT et PSOBAN ont réussi un certain débit sur une durée de dix mille tours, PROPOSED3 a réussi un débit très élevé et remarquable. Ces données montrent catégoriquement les performances du PROPOSED3 en termes d'efficacité et de capacité de transmission de données.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, deux protocoles de routage à base de cluster (CHSFL, Improved-CHSFL) et à base de chaîne (PROPOSED 3) pour les WBANs sont exposés dans le but d'améliorer la durée de vie des WBANs. Nous avons décrit les méthodes utilisées, les étapes suivies lors de la simulation et nous avons discuté les résultats obtenus. Notre comparaison des résultats de simulation des deux algorithmes a révélé que, contrairement au CHSFL, I-CHSFL peut augmenter la durée de vie du réseau de près de 34 %. Cette amélioration n'est pas définitive car elle dépend de la structure spécifique du réseau proposé et de ses paramètres. Ce résultat est donc strictement relatif à la structure de réseau utilisée. Pour notre approche à base de chaîne pour les réseaux WBAN, PROPOSED3 présente des performances exceptionnelles en ce qui concerne le débit élevé, l'efficacité énergétique et la gestion optimale des paquets de données, ce qui en fait une approche très compétitive et pertinente pour les WBAN.

Conclusion générale

Ces dernières années, la technologie est devenue omniprésente dans notre quotidien. En raison des progrès technologiques et de la création de composants électroniques miniaturisés et abordables, les personnes ont maintenant accès à des solutions avancées pour surveiller automatiquement et en temps réel leurs paramètres physiologiques grâce aux WBANs. Les ambulances intelligentes jouent un rôle essentiel dans le domaine de la médecine d'urgence en intégrant ces réseaux de capteurs corporels afin de prodiguer des soins immédiats et précis aux patients en situation de détresse. En reliant les capteurs aux systèmes de communication des ambulances, il est envisageable de communiquer immédiatement les informations essentielles aux équipes médicales, ce qui permet d'optimiser la prise de décision et d'améliorer la qualité des interventions d'urgence.

Dans ce travail de thèse, nous avons examiné comment l'Internet des Objets (IoT) peut être intégré dans le domaine médical, notamment dans le domaine des ambulances intelligentes et de la médecine d'urgence, où les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN) jouent un rôle essentiel. Nous avons souligné l'importance des WBAN dans la collecte et la transmission en temps réel de données médicales vitales, tout en mettant en évidence la principale limite de ces réseaux : la capacité énergétique limitée des capteurs.

Devant cette difficulté, notre étude a suggéré des solutions innovantes afin d'améliorer l'efficacité énergétique des capteurs médicaux et de prolonger la durée de vie des WBAN. Deux stratégies ont été examinées : la première repose sur un algorithme d'élection des chefs de cluster (CH) basé

sur la logique floue [102], visant à améliorer la gestion des ressources et à réduire la consommation d'énergie. La seconde stratégie s'appuie sur la formation de chaînes optimisées pour le transfert de données [103], ce qui montre des résultats prometteurs en ce qui concerne la prolongation de la durée de vie du réseau.

Les résultats obtenus confirment que les méthodes suggérées peuvent surmonter certaines des principales contraintes des WBAN, ce qui permet une gestion améliorée des ressources énergétiques tout en assurant la fiabilité des transmissions de données dans les environnements critiques des ambulances connectées. Grâce à l'IoT, ces progrès offrent de nouvelles opportunités pour améliorer constamment les soins d'urgence, contribuant ainsi à une médecine plus réactive et efficace.

En conclusion, les contributions de cette thèse apportent des solutions concrètes et applicables aux défis rencontrés lors de l'utilisation des WBAN dans les applications médicales d'urgence. Elles soulignent également l'importance de poursuivre les recherches et les études afin de créer des technologies encore plus avancées, capables de satisfaire les besoins grandissants des systèmes de santé connectés de l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. Rajeswari, N. Vivekanandan, P. Amitaraj, and A. Fulambarkar, 'A Study on Redesigning Modern Healthcare Using Internet of Things', in *Healthcare Systems Management: Methodologies and Applications*, P. K. Ray and J. Maiti, Eds., in *Managing the Asian Century.*, Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 59–69. doi: 10.1007/978-981-10-5631-4_6.
- [2] H. N. Saha, N. F. Raun, and M. Saha, 'Monitoring patient's health with smart ambulance system using Internet of Things (IOTs)', in *2017 8th Annual Industrial Automation and Electromechanical Engineering Conference (IEMECON)*, Bangkok, Thailand: IEEE, Aug. 2017, pp. 91–95. doi: 10.1109/IEMECON.2017.8079568.
- [3] T. Rutherford and A. Socio, 'Population ageing: statistics', *House Commons Libr. Stand. Retrieved Jan 2 2013 Www Parliam. UktopicsPopulationArchive*, 2012, Accessed: Sep. 05, 2024. [Online]. Available: <https://data.londonport.org/download/e6n1n/315/LSR178%20Rutherford,%20T.%20-%20Population%20Ageing%20-%20Statistics.pdf>
- [4] R. Goyal, N. Mittal, L. Gupta, and A. Surana, 'Routing Protocols in Wireless Body Area Networks: Architecture, Challenges, and Classification', *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2023, pp. 1–19, Jan. 2023, doi: 10.1155/2023/9229297.
- [5] A. Dumka and A. Sah, 'Smart ambulance system using concept of big data and internet of things', in *Healthcare Data Analytics and Management*, Elsevier, 2019, pp. 155–176. doi: 10.1016/B978-0-12-815368-0.00006-3.
- [6] A. Makke, 'Détection d'attaques dans un système WBAN de surveillance médicale à distance', 2014.
- [7] H. Taleb, A. Nasser, G. Andrieux, N. Charara, and E. Motta Cruz, 'Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey', *Wirel. Netw.*, vol. 27, no. 8, pp. 5271–5295, Nov. 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02780-2.
- [8] T. Hayajneh, G. Almashaqbeh, S. Ullah, and A. V. Vasilakos, 'A survey of wireless technologies coexistence in WBAN: analysis and open research issues', *Wirel. Netw.*, vol. 20, no. 8, pp. 2165–2199, Nov. 2014, doi: 10.1007/s11276-014-0736-8.
- [9] Q. Liu, K. G. Mkongwa, and C. Zhang, 'Performance issues in wireless body area networks for the healthcare application: a survey and future prospects', *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2, p. 155, Feb. 2021, doi: 10.1007/s42452-020-04058-2.
- [10] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, 'Wireless sensor networks: a survey', *Comput. Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [11] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury, 'A survey on wireless multimedia sensor networks', *Comput. Netw.*, vol. 51, no. 4, pp. 921–960, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.comnet.2006.10.002.
- [12] A.-B. García-Hernando, J.-F. Martínez-Ortega, J.-M. López-Navarro, A. Prayati, and L. Redondo-López, Eds., *Problem Solving for Wireless Sensor Networks*. in *Computer Communications and Networks*. London: Springer London, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-203-6.
- [13] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, 'A Survey on Sensor Networks', *Commun. Mag. IEEE*, vol. 40, pp. 102–114, Sep. 2002, doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422.
- [14] R. C. Shah and J. M. Rabaey, 'Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks', in *2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No.02TH8609)*, Orlando, FL, USA: IEEE, 2002, pp. 350–355. doi: 10.1109/WCNC.2002.993520.
- [15] R. Negra, I. Jemili, and A. Belghith, 'Wireless Body Area Networks: Applications and Technologies', *Procedia Comput. Sci.*, vol. 83, pp. 1274–1281, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.04.266.
- [16] P. Johansson, Ericsson Research, M. Kazantzidis, R. Kapoor and M. Gerla, "Bluetooth: An Enabler for Personal Area Networking", *IEEE Network*, 2001.

- [17] S. Bouldjadj, 'Sureté de fonctionnement des réseaux de capteurs médicaux', 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.20860.62084.
- [18] Z. Guo, I. G. Harris, L. Tsaur, and X. Chen, 'An on-demand scatternet formation and multi-hop routing protocol for BLE-based wireless sensor networks', in *2015 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, IEEE, 2015, pp. 1590–1595. Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7127705/>
- [19] M. Siekkinen, M. Hienkari, J. K. Nurminen, and J. Nieminen, 'How low energy is bluetooth low energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4', in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Apr. 2012, pp. 232–237. doi: 10.1109/WCNCW.2012.6215496.
- [20] M. Ghamari, B. Janko, R. S. Sherratt, W. Harwin, R. Piechockic, and C. Soltanpur, 'A Survey on Wireless Body Area Networks for eHealthcare Systems in Residential Environments', *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 831, Jun. 2016, doi: 10.3390/s16060831.
- [21] C. H. Vallejos de Schatz, H. P. Medeiros, F. K. Schneider, and P. J. Abatti, 'Wireless medical sensor networks: design requirements and enabling technologies', *Telemed. J. E-Health Off. J. Am. Telemed. Assoc.*, vol. 18, no. 5, pp. 394–399, Jun. 2012, doi: 10.1089/tmj.2011.0169.
- [22] R. G. Shankari, 'Visible Light Communication Using Li-Fi', *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 3072–3075, Apr. 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.4513.
- [23] S. Riurean, T. Antipova, A. Rocha, M. Leba, and A. Ionica, 'Li-Fi Embedded Wireless Integrated Medical Assistance System', in *New Knowledge in Information Systems and Technologies*, vol. 931, Á. Rocha, H. Adeli, L. P. Reis, and S. Costanzo, Eds., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 931. , Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 350–360. doi: 10.1007/978-3-030-16184-2_34.
- [24] R. R. Sharma and A. Sanganal, 'Transmission of data through light', vol. 5, 2014.
- [25] 'INTERNATIONAL STANDARD, ISO/IEC/IEEE 8802-15-6:2017(E)'.
- [26] S. Ullah *et al.*, 'A comprehensive survey of Wireless Body Area Networks : on PHY, MAC, and Network layers solutions', *J. Med. Syst.*, vol. 36, no. 3, pp. 1065–1094, Jun. 2012, doi: 10.1007/s10916-010-9571-3.
- [27] M. M. Alam and E. Ben Hamida, 'Strategies for Optimal MAC Parameters Tuning in IEEE 802.15.6 Wearable Wireless Sensor Networks', *J. Med. Syst.*, vol. 39, no. 9, p. 106, Sep. 2015, doi: 10.1007/s10916-015-0277-4.
- [28] Olatinwo, Abu-Mahfouz, and Hancke, 'A Survey on LPWAN Technologies in WBAN for Remote Health-Care Monitoring', *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5268, Nov. 2019, doi: 10.3390/s19235268.
- [29] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, 'A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things', *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [30] O. Khutsoane, B. Isong, and A. M. Abu-Mahfouz, 'IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN', in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing: IEEE, Oct. 2017, pp. 6107–6112. doi: 10.1109/IECON.2017.8217061.
- [31] P. Phalaagae, A. M. Zungeru, B. Sigweni, J. M. Chuma, and T. Semong, 'Applications and Communication Technologies in IoT Sensor Networks', in *Green Internet of Things Sensor Networks*, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 9–23. doi: 10.1007/978-3-030-54983-1_2.
- [32] T. Janssen, M. Aernouts, R. Berkvens, and M. Weyn, 'Outdoor Fingerprinting Localization Using Sigfox', in *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nantes: IEEE, Sep. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPIN.2018.8533826.
- [33] A. Ali, G. A. Shah, M. O. Farooq, and U. Ghani, 'Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey', *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 83, pp. 124–139, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2017.02.002.

- [34] J. P. Queralta, T. N. Gia, Z. Zou, H. Tenhunen, and T. Westerlund, 'Comparative Study of LPWAN Technologies on Unlicensed Bands for M2M Communication in the IoT: beyond LoRa and LoRaWAN', *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, pp. 343–350, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.08.049.
- [35] S. B. Baker, W. Xiang, and I. Atkinson, 'Internet of Things for Smart Healthcare: Technologies, Challenges, and Opportunities', *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26521–26544, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2775180.
- [36] Y. Li, X. Cheng, Y. Cao, D. Wang, and L. Yang, 'Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT)', *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1505–1515, Jun. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2781251.
- [37] Mostafizur Rahman Masum, 'LTE-M and NB-IoT', 2018, doi: 10.13140/RG.2.2.19978.72643.
- [38] P. Kakria, N. K. Tripathi, and P. Kitipawang, 'A Real-Time Health Monitoring System for Remote Cardiac Patients Using Smartphone and Wearable Sensors', *Int. J. Telemed. Appl.*, vol. 2015, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1155/2015/373474.
- [39] C.-T. Kone, 'Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension'.
- [40] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, 'Wireless integrated network sensors', *Commun. ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 51–58, May 2000, doi: 10.1145/332833.332838.
- [41] A. Makhoul, 'Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données', 2008.
- [42] B. Fong, A. C. M. Fong, and C. K. Li, 'Internet of Things in Smart Ambulance and Emergency Medicine', in *Internet of Things A to Z*, 1st ed., Q. Hassan, Ed., Wiley, 2018, pp. 475–506. doi: 10.1002/9781119456735.ch17.
- [43] E. Jovanov, J. Price, D. Raskovic, K. Kavi, T. Martin, and R. Adhami, 'Wireless personal area networks in telemedical environment', in *Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine. ITAB-ITIS 2000. Joint Meeting Third IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine (ITAB'00). Third Works*, Arlington, VA, USA: IEEE, 2000, pp. 22–27. doi: 10.1109/ITAB.2000.892342.
- [44] S. Spinsante and E. Gambi, 'Remote health monitoring by OSGi technology and digital TV integration', *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1434–1441, Nov. 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6415017.
- [45] P. Rolin, 'Utilisation des applications de santé et des objets connectés par les médecins et les pharmaciens d'officine français en 2017'.
- [46] K. Ashton, 'That "internet of things" thing', *RFID J.*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.
- [47] 'These-Amira-Hakim.pdf'. Accessed: Sep. 18, 2024. [Online]. Available: <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2021/06/These-Amira-Hakim.pdf>
- [48] H. Taleb, 'Une architecture pour l'intégration du Cloud Computing dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)'.
- [49] R. Ara, A. Rahim, S. Roy, and D. U. K. Prodhon, '167 Cloud Computing Architecture, Services, Deployment Models, Storage, Benefits and Challenges', 2020.
- [50] H. Taleb, 'Une architecture pour l'intégration du Cloud Computing dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)'.
- [51] T. Djemai, 'Placement optimisé de services dans les architectures fog computing et internet of things sous contraintes d'énergie, de QoS et de mobilité'.
- [52] L. E. Garoui, 'Approches de routage basees sur les technologies emergentes SDN et IoT pour les environnements intelligents'.
- [53] S. Tlili, S. Mnasri, and T. Val, 'A survey on IoT Routing: Types, Challenges and Contribution of Recent Used Intelligent Methods', in *2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT)*, Tabuk, Saudi Arabia: IEEE, Jan. 2022, pp. 161–166. doi: 10.1109/ICCIT52419.2022.9711649.

- [54] H. Prasad and S. Babu, 'A Survey on Network Routing Protocols in Internet of Things (IOT)', *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 160, no. 2, pp. 18–22, Feb. 2017, doi: 10.5120/ijca2017912973.
- [55] T. Tsvetkov, 'RPL: IPv6 Routing Protocol for LOW Power and Lossy Networks', 2011, doi: 10.2313/NET-2011-07-1_09.
- [56] A. Aijaz, H. Su, and A.-H. Aghvami, 'CORPL: A Routing Protocol for Cognitive Radio Enabled AMI Networks', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 477–485, Jan. 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2324022.
- [57] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, S. Kim, P. Levis, and A. Woo, 'The Collection Tree Protocol (CTP)'.
- [58] S. Basagni, C. Petrioli, R. Petrocchia, and D. Spaccini, 'CARP: A Channel-aware routing protocol for underwater acoustic wireless networks', *Ad Hoc Netw.*, vol. 34, pp. 92–104, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2014.07.014.
- [59] N. Jeba and V. Kamala, 'A Survey on Routing Protocols for Internet of Things', vol. 3, no. 5, 2016.
- [60] R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti, and R. Verdone, 'A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges', *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 16, no. 3, pp. 1635–1657, 2014.
- [61] S. M. Demir, F. Al-Turjman, and A. Muhtaroglu, 'Energy Scavenging Methods for WBAN Applications: A Review', *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 16, pp. 6477–6488, Aug. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2851187.
- [62] M. Salayma, A. Al-Dubai, I. Romdhani, and Y. Nasser, 'Wireless Body Area Network (WBAN): A Survey on Reliability, Fault Tolerance, and Technologies Coexistence', *ACM Comput. Surv.*, vol. 50, Mar. 2017, doi: 10.1145/3041956.
- [63] T. Tamura, T. Yoshimura, M. Uchida, and O. Tanaka, 'A Wearable Airbag to Prevent Fall Injuries', *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. Publ. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 13, pp. 910–4, Nov. 2009, doi: 10.1109/TITB.2009.2033673.
- [64] B. Braem, B. Latre, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, *The Wireless Autonomous Spanning tree Protocol for Multihop Wireless Body Area Networks*. 2006, p. 8. doi: 10.1109/MOBIQW.2006.361753.
- [65] M. Li, W. Lou, and K. Ren, 'Data security and privacy in wireless body area networks', *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 51–58, Feb. 2010, doi: 10.1109/MWC.2010.5416350.
- [66] R. Ali and A.-S. Pathan, 'The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey', *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 14, p. 155014771876899, Apr. 2018, doi: 10.1177/1550147718768994.
- [67] Q. Tang, N. Tummala, S. K. S. Gupta, and L. Schwiebert, 'TARA: Thermal-Aware Routing Algorithm for Implanted Sensor Networks', in *Distributed Computing in Sensor Systems*, vol. 3560, V. K. Prasanna, S. S. Iyengar, P. G. Spirakis, and M. Welsh, Eds., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 3560, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 206–217. doi: 10.1007/11502593_17.
- [68] A. Bag and M. A. Bassiouni, 'Hotspot Preventing Routing algorithm for delay-sensitive applications of in vivo biomedical sensor networks', *Inf. Fusion*, vol. 9, no. 3, pp. 389–398, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.inffus.2007.02.001.
- [69] N. Javaid, Z. Abbas, M. S. Fareed, Z. A. Khan, and N. Alrajeh, 'M-ATTEMPT: A New Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Sensor Networks', *Procedia Comput. Sci.*, vol. 19, pp. 224–231, 2013, doi: 10.1016/j.procs.2013.06.033.
- [70] A. R. Bhangwar, P. Kumar, A. Ahmed, and M. I. Channa, 'Trust and Thermal Aware Routing Protocol (TTRP) for Wireless Body Area Networks', *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 97, no. 1, pp. 349–364, Nov. 2017, doi: 10.1007/s11277-017-4508-5.

- [71] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, 'Wireless Body Area Networks: A Survey', *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, Jan. 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.121313.00064.
- [72] Z. A. Khan, S. Sivakumar, W. Phillips, B. Robertson, and N. Javaid, 'QPRD: QoS-Aware Peering Routing Protocol for Delay-Sensitive Data in Hospital Body Area Network', *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2015, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1155/2015/153232.
- [73] Z. A. Khan, S. Sivakumar, W. Phillips, and B. Robertson, 'A QoS-aware Routing Protocol for Reliability Sensitive Data in Hospital Body Area Networks', *Procedia Comput. Sci.*, vol. 19, pp. 171–179, 2013, doi: 10.1016/j.procs.2013.06.027.
- [74] V. Ayatollahitafti, M. A. Ngadi, J. B. Mohamad Sharif, and M. Abdullahi, 'An Efficient Next Hop Selection Algorithm for Multi-Hop Body Area Networks', *PLOS ONE*, vol. 11, no. 1, p. e0146464, Jan. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0146464.
- [75] M. Y. Arafat, S. Pan, and E. Bak, 'QQAR: A Q-learning-based QoS-aware routing for IoMT-enabled wireless body area networks for smart healthcare', *Internet Things*, vol. 26, p. 101151, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101151.
- [76] A. Maskooki, C. B. Soh, E. Gunawan, and K. S. Low, 'Opportunistic routing for body area network', in *2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, Jan. 2011, pp. 237–241. doi: 10.1109/CCNC.2011.5766463.
- [77] S. Movassaghi, M. Abolhasan, and J. Lipman, 'Energy Efficient Thermal and Power Aware (ETPA) Routing in Body Area Networks'.
- [78] X. Liang *et al.*, 'Exploiting prediction to enable Secure and Reliable routing in Wireless Body Area Networks', in *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA: IEEE, Mar. 2012, pp. 388–396. doi: 10.1109/INFOCOM.2012.6195777.
- [79] R. Goyal, R. B. Patel, H. S. Bhaduria, and D. Prasad, 'An Efficient Data Delivery Scheme in WBAN to Deal with Shadow Effect due to Postural Mobility', *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 117, no. 1, pp. 129–149, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11277-019-06997-5.
- [80] B. Latre *et al.*, 'A Low-delay Protocol for Multihop Wireless Body Area Networks', in *2007 Fourth Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services (MobiQuitous)*, Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2007, pp. 1–8. doi: 10.1109/MOBIQ.2007.4451060.
- [81] A. G. Ruzzelli, R. Jurdak, G. M. P. O'Hare, and P. Van Der Stok, 'Energy-efficient multi-hop medical sensor networking', in *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments*, San Juan Puerto Rico: ACM, Jun. 2007, pp. 37–42. doi: 10.1145/1248054.1248064.
- [82] Y. Bi, L. X. Cai, X. Shen, and H. Zhao, 'A Cross Layer Broadcast Protocol for Multihop Emergency Message Dissemination in Inter-Vehicle Communication', in *2010 IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, South Africa: IEEE, May 2010, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICC.2010.5501865.
- [83] T. Watteyne, I. Augé-Blum, M. Dohler, and D. Barthel, 'AnyBody: a self-organization protocol for body area networks', in *Proceedings of the Second International Conference on Body Area Networks BodyNets*, Florence, Italy: ICST, 2007. doi: 10.4108/bodynets.2007.186.
- [84] T. A. Alghamdi, 'Cluster Based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Network', *Trends Appl. Sci. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 12–18, Jan. 2016, doi: 10.3923/tasr.2016.12.18.
- [85] Z. Ullah, I. Ahmed, K. Razzaq, M. K. Naseer, and N. Ahmed, 'DSCB: Dual sink approach using clustering in body area network', *Peer-Peer Netw. Appl.*, vol. 12, no. 2, pp. 357–370, Mar. 2019, doi: 10.1007/s12083-017-0587-z.
- [86] H. Helal, F. Sallabi, M. A. Sharaf, S. Harous, M. Hayajneh, and H. Khater, 'HCEL: Hybrid Clustering Approach for Extending WBAN Lifetime', *Mathematics*, vol. 12, no. 7, p. 1067, Apr. 2024, doi: 10.3390/math12071067.

- [87] F. Afsana, N. Jahan, and M. S. Kaiser, 'An energy efficient cluster based forwarding scheme for body area network using nano-scale electromagnetic communication', in *2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, Dec. 2015, pp. 491–494. doi: 10.1109/WIECON-ECE.2015.7443975.
- [88] R. A. Khan *et al.*, 'An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Sensor Networks', *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 99, no. 4, pp. 1443–1454, Apr. 2018, doi: 10.1007/s11277-018-5285-5.
- [89] N. Arora, S. H. Gupta, and B. Kumar, 'An approach to investigate the best location for the central node placement for energy efficient WBAN', *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 5, pp. 5789–5800, May 2023, doi: 10.1007/s12652-020-01847-w.
- [90] Z. Ullah *et al.*, 'Energy-Efficient Harvested-Aware Clustering and Cooperative Routing Protocol for WBAN (E-HARP)', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100036–100050, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930652.
- [91] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, 'Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks', in *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*, IEEE, 2000, pp. 10-pp.
- [92] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, 'Wireless sensor networks: a survey Computer Networks. vol. 38', 2002.
- [93] S. Chen and D. Zhang, 'Robust Image Segmentation Using FCM With Spatial Constraints Based on New Kernel-Induced Distance Measure', *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern. Publ. IEEE Syst. Man Cybern. Soc.*, vol. 34, pp. 1907–16, Sep. 2004, doi: 10.1109/TSMCB.2004.831165.
- [94] H. Lin, 'Method of Image Segmentation on High-Resolution Image and Classification for Land Covers', *Int. Conf. Nat. Comput.*, vol. 5, pp. 563–566, Jan. 2008, doi: 10.1109/ICNC.2008.870.
- [95] S. Ghosh and S. K. Dubey, 'Comparative analysis of k-means and fuzzy c-means algorithms', *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 4, no. 4, 2013.
- [96] Department of Computer Science, Babasaheb Bhimrao Ambedkar University, Lucknow, India, P. Mamoria, and D. Raj, 'Comparison of Mamdani Fuzzy Inference System for Multiple Membership Functions', *Int. J. Image Graph. Signal Process.*, vol. 8, no. 9, pp. 26–30, Sep. 2016, doi: 10.5815/ijigsp.2016.09.04.
- [97] H. Wu, H. Zhu, L. Zhang, and Y. Song, 'Energy efficient chain based routing protocol for orchard wireless sensor network', *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 14, pp. 2137–2146, 2019.
- [98] S. Rani, S. H. Ahmed, J. Malhotra, and R. Talwar, 'Energy efficient chain based routing protocol for underwater wireless sensor networks', *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 92, pp. 42–50, 2017.
- [99] N. Bilandi, H. K. Verma, and R. Dhir, 'PSOBAN: a novel particle swarm optimization based protocol for wireless body area networks', *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 11, p. 1492, Nov. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1514-0.
- [100] P. Bedi, S. Das, S. B. Goyal, P. K. Shukla, S. Mirjalili, and M. Kumar, 'A novel routing protocol based on grey wolf optimization and Q learning for wireless body area network', *Expert Syst. Appl.*, vol. 210, p. 118477, 2022.
- [101] A. Ahmad, N. Javaid, U. Qasim, M. Ishfaq, Z. A. Khan, and T. A. Alghamdi, 'RE-ATTEMPT: a new energy-efficient routing protocol for wireless body area sensor networks', *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 10, no. 4, p. 464010, 2014.
- [102] L. Sidhoum, M. Hadjila, and R. Merzougui, 'Cluster Head Election Algorithm Based on Fuzzy Logic to Improve Lifespan in WBAN', in *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)*, Setif, Algeria: IEEE, May 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEEAC61226.2024.10576349.
- [103] L. Sidhoum, M. Hadjila, and R. Merzougui, 'Chain based routing approach to improve lifespan in wireless body area networks', *TELKOMNIKA Telecommun. Comput. Electron. Control*, vol. 22, no. 2, p. 427, Apr. 2024, doi: 10.12928/telkomnika.v22i2.25745.

