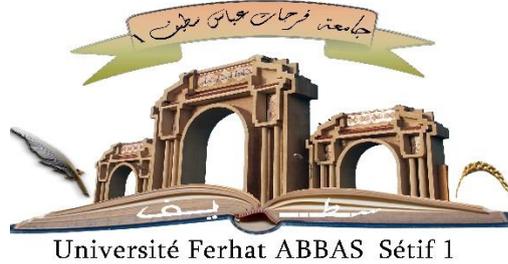


République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ferhat Abbas -Sétif 1

Faculté des Sciences



# Thèse de Doctorat

**En Sciences**

**Option**

Réseaux et Systèmes Distribués

**Thème**

---

## **Sureté de fonctionnement des Réseaux de Capteurs Médicaux**

---

Présenté par

**Samir BOULDJADJ**

**Devant le jury :**

Fouzi SEMCHEDINE	Président	Prof	Sétif 1
Zibouda ALIOUAT	Rapporteur	Prof	Sétif 1
Makhlouf ALIOUAT	Co-Rapporteur	Prof	Sétif 1
Mohammed BENMOHAMMED	Examineur	Prof	Constantine 2
Abdelmalek BOUDRIES	Examineur	MCA	Béjaia
Mourad AMAD	Examineur	MCA	Bouira

**Année 2020**

# Résumé

Les réseaux sans fil corporels (WBANs) sont l'une des technologies les plus prometteuses. Le faible coût des biocapteurs et leur grande variété permettent une diversité d'applications WBAN qui peuvent améliorer la qualité de vie et les services de soins médicaux. Ces capteurs doivent communiquer entre eux sans fil. Cette communication et les autres activités des capteurs produisent de la chaleur provoquant une élévation de la température. Cette température ne doit pas être très élevée car elle peut endommager les organes sensibles du corps et les tissus environnants. Les protocoles de routage à base de température est la classe de protocoles de routage pour les WBANs proposés pour résoudre ce problème. De nombreux protocoles ont été proposés au cours de la dernière décennie et demie. Dans cette thèse, nous proposons HTTRP, un nouveau protocole de routage pour les WBANs introduisant un nouveau mécanisme de sélection de route qui vise à réduire la surchauffe des capteurs et à équilibrer leur consommation d'énergie. Ce mécanisme est basé sur une fonction qui prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds capteurs et leur température lors du choix du prochain nœud relais. Les résultats de la simulation effectuée montrent que notre protocole HTTRP a de meilleures performances en termes de durée de vie du réseau, d'équilibrage de charge, d'élévation de température et de débit par rapport à un représentant de TARP qui est le protocole TARA.

**Mots-clés :** sensible à l'énergie, protocoles de routage, sensible à la chaleur, débit, réseaux sans fil corporels.

## Abstract

Wireless Body Area Networks (WBANs) are one of the most promising technologies. The low cost of the biosensors and their wide variety allow a diversity of WBAN applications that can improve life quality and medical health care services. These sensors need to communicate wirelessly. This communication and other sensors' activities produce heat causing a temperature rise. This temperature should not be very high because it can damage the sensible body organs and the surrounding tissues. The temperature-aware routing protocol is the class of routing protocols for WBANs proposed to address this problem. Many protocols have been proposed in the last decade and a half. In this thesis, we propose HTTRP, a new routing protocol for WBANs introducing a new route selection mechanism that aims to reduce the overheating of sensors and balance their energy consumption. This mechanism is based on a function that considers the residual energy of sensor nodes and their temperature when choosing the next relay node. The carried-out simulation results show that our HTTRP protocol has better performance in terms of network lifetime, charge balancing, temperature rise, and throughput compared to a representative of TARP that is TARA protocol.

**Keywords:** *Energy-aware, Routing protocols, Thermal-aware, Throughput, Wireless Body Area Networks.*

## ملخص

تعد شبكات منطقة الجسم اللاسلكية (WBANs) واحدة من أكثر التقنيات الواعدة حيث تسمح التكلفة المنخفضة لأجهزة الاستشعار الحيوية وتنوعها الواسع بتنوع تطبيقات WBANs التي يمكنها تحسين جودة الحياة وخدمات الرعاية الصحية الطبية. تحتاج أجهزة الاستشعار هذه إلى التواصل بينها لاسلكيًا. ينتج هذا الاتصال وأنشطة أجهزة الاستشعار الأخرى الحرارة مما يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة. لا ينبغي أن تكون درجة الحرارة عالية جدًا لأنها يمكن أن تتلف أعضاء الجسم الحساسة والأنسجة المحيطة بها. بروتوكول التوجيه المدرك لدرجة الحرارة هو فئة بروتوكولات التوجيه لشبكات WBANs المقترحة لمعالجة هذه المشكلة. تم اقتراح العديد من البروتوكولات في العقد ونصف العقد الماضيين. في هذه الأطروحة، نقترح HTTRP، وهو بروتوكول توجيه جديد لشبكات WBANs يقدم آلية جديدة لاختيار المسار تهدف إلى تقليل ارتفاع درجة حرارة أجهزة الاستشعار وموازنة استهلاكها للطاقة. تعتمد هذه الآلية على وظيفة تراعي الطاقة المتبقية للمستشعرات ودرجة حرارتها عند اختيار عقدة التتابع التالية. تظهر نتائج المحاكاة المنفذة أن بروتوكول HTTRP الخاص بنا يتمتع بأداء أفضل من حيث عمر الشبكة، موازنة الجهد، ارتفاع درجة الحرارة، والإنتاجية مقارنة بممثل عن TARP وهو بروتوكول TARA.

**الكلمات الرئيسية:** مدرك للطاقة، بروتوكولات التوجيه، مدرك للحرارة، الإنتاجية، شبكات منطقة الجسم اللاسلكية.

## Remerciements

Au nom d'Allah, le plus gracieux et le plus miséricordieux. Je remercie ALLAH pour la force et la bénédiction qu'il me donne. Je ne me suis jamais attendu à ce que j'arrive à terminer ce travail sans l'aide d'Allah.

Ma plus sincère gratitude va à mon directeur de thèse, le Pr. Zibouda ALIOUAT, pour son formidable soutien académique, sa disponibilité, son encouragement et soutien moral. Mes très vifs remerciements vont à mon codirecteur de thèse, le Pr. Makhlouf ALIOUAT qui m'a donné l'opportunité de travailler sur ce domaine.

Je tiens à remercier les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Enfin j'exprime ma profonde reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Merci à tous.

## Dédicaces

A la mémoire de mon très cher père,

A ma très chère mère que Dieu me la garde,

A ma petite et grande famille chacun de son nom,

A tous qui m'ont encouragé et aidé dans la réalisation de ce travail,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment,

Je dédie ce modeste travail

## Abréviations

CH	Cluster Head
CO <sub>2</sub>	Carbone Gazeux
ECG	ElectroCardioGraphie
EEG	Electro-EncéphaloGraphie
EMG	ÉlectroMyoGramme
GPRS	General Packet Radio Service
HTTRP	High Throughput and Thermal aware Routing Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MAC	Medium Access Control
MCV	Maladies CardioVasculaires
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PDA	Personal Digital Assistant
QoS	Quality of Service
SHR	Shortest Hop Routing
TAR	Thermal Aware Routing
TDMA	Time Division Multiple Access
WBAN	Wireless Body Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

# Table des matières

<i>Liste des Tableaux</i> .....	<i>ix</i>
<i>Liste des Figures</i> .....	<i>x</i>
<i>Introduction générale</i> .....	<i>1</i>
<b>1. Généralités sur les Wireless Body Area Networks</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1 Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2 Les réseaux WBANs vs les réseaux WSNs</b> .....	<b>6</b>
1.2.1 Définition d'un WSN .....	6
1.2.2 Définition d'un WBAN .....	7
1.2.3 Comparaison entre les réseaux WBANs et les réseaux WSNs .....	7
<b>1.3 Architecture de communication des WBANs</b> .....	<b>9</b>
1.3.1 Le niveau Intra-BAN .....	10
1.3.2 Le niveau Inter-BAN .....	10
1.3.3 Le niveau Extra-BAN .....	10
<b>1.4 Domaines d'application des WBANs</b> .....	<b>11</b>
1.4.1 Domaine médical .....	11
1.4.2 Domaine non médical .....	12
1.4.2.1 Domaine militaire .....	12
1.4.2.2 Entraînement sportif .....	13
1.4.2.3 Applications de divertissement .....	13
<b>1.5 Topologies des réseaux WBAN</b> .....	<b>15</b>
1.5.1 Topologie point à point .....	15
1.5.2 Topologie en étoile .....	16
1.5.3 Topologie en maille .....	16
1.5.4 Topologie en arbre .....	17
<b>1.6 Les capteurs</b> .....	<b>18</b>

<b>1.6.1</b>	<b>Types d'équipements .....</b>	<b>18</b>
1.6.1.1	Définition d'un capteur médical sans fil .....	18
1.6.1.2	Définition d'un actionneur sans fil .....	18
1.6.1.3	Définition d'appareil personnel sans fil .....	18
<b>1.6.2</b>	<b>Architecture d'un capteur .....</b>	<b>19</b>
<b>1.6.3</b>	<b>Exemples des capteurs médicaux utilisés dans les WBANs .....</b>	<b>20</b>
1.6.3.1	Capteurs de mesure des signes vitaux .....	20
1.6.3.2	Capteurs de détection des mouvements du corps humain .....	22
1.6.3.3	Capteurs de surveillance de l'environnement autour de corps humain .....	22
<b>1.6.1</b>	<b>Systemes d'exploitation des capteurs .....</b>	<b>24</b>
<b>1.7</b>	<b>Technologies de communication des WBANs .....</b>	<b>24</b>
<b>1.7.1</b>	<b>Bluetooth .....</b>	<b>25</b>
<b>1.7.2</b>	<b>ZigBee .....</b>	<b>26</b>
<b>1.7.3</b>	<b>IEEE 802.15.4 .....</b>	<b>26</b>
<b>1.7.4</b>	<b>IEEE 802.15.6 .....</b>	<b>26</b>
<b>1.8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>Communication dans les Wireless Body Area Networks .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2</b>	<b>Routage dans WBAN .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Challenges de routages dans les WBANs .....</b>	<b>29</b>
2.3.1	Posture corporelle .....	29
2.3.2	Consommation d'énergie .....	30
2.3.3	Surchauffe et absorption de rayonnement .....	31
2.3.4	Durée de vie globale de réseau .....	31
2.3.5	Limitation du nombre de sauts des paquets .....	32
2.3.6	Hétérogénéité de l'environnement .....	32
2.3.7	La qualité de service et la fiabilité .....	32
2.3.8	Sécurité et confidentialité .....	33

2.3.9	Fiabilité et tolérance aux pannes .....	33
<b>2.4</b>	<b>Protocoles de routage pour les WBANs .....</b>	<b>34</b>
2.4.1	Les protocoles à base de cluster .....	34
2.4.2	Les protocoles Cross-layer .....	36
2.4.3	Les protocoles à base de posture .....	38
2.4.4	Les protocoles à base de qualité de services .....	39
2.4.5	Les protocoles à base de température .....	41
2.4.5.1	Thermal-Aware Routing Algorithm .....	42
2.4.5.2	Least Temperature Routing .....	44
2.4.5.3	Adaptive Least Temperature Routing .....	45
2.4.5.4	Least Total Route Temperature .....	46
2.4.5.5	Hotspot Preventing Routing .....	48
2.4.5.6	Routing Algorithm for network of homogeneous and Id-less bio medical sensor Nodes .....	49
2.4.5.7	Thermal Aware Shortest Hop Routing.....	50
2.4.5.8	Mobility supporting Adaptive Threshold-based Thermal-aware Energy efficient Multi hop ProTocol	51
2.4.5.9	Thermal-Aware Multiconstrained Intrabody QoS Routing .....	52
2.4.5.10	Mobility-Based Temperature-Aware Routing Protocol .....	53
2.4.5.11	Traffic Control Thermal-Aware Routing in Body Area Networks.....	54
2.4.5.12	Trust and Thermal Aware Routing Protocol.....	55
2.4.5.13	Temperature-Aware Routing using Secondary Sink in Wireless Body Area Sensor Network .	56
2.4.5.14	Adaptive Thermal-Aware Routing Protocol .....	57
2.4.5.15	Thermal Aware Routing Algorithm for a wireless body area network.....	58
2.4.5.16	Thermal Aware & Energy Optimized Routing Protocol for WBANs .....	59
<b>2.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>
<b>3</b>	<b>Contribution : Protocole de Routage à base de température pour les Wireless Body Area Networks .....</b>	<b>64</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>64</b>
<b>3.2</b>	<b>Critique des protocoles de routage à base de température.....</b>	<b>65</b>
<b>3.3</b>	<b>Protocole proposé .....</b>	<b>66</b>
3.3.1	Présentation de HTRP.....	66
3.3.2	Modèle de système et hypothèses préliminaires .....	67

3.3.2.1	Modèle de réseau .....	67
<b>3.3.3</b>	<b>Description du protocole HTTRP .....</b>	<b>68</b>
3.3.3.1	Phase d'initialisation .....	68
3.3.3.2	Phase de routage .....	68
<b>3.3.4</b>	<b>Implémentation et simulation .....</b>	<b>72</b>
3.3.4.1	Analyse de la consommation d'énergie .....	72
3.3.4.2	Modèle de simulation .....	73
<b>3.4</b>	<b>RÉSULTATS DE SIMULATION .....</b>	<b>76</b>
3.4.1	Durée de vie du réseau .....	76
3.4.2	Équilibrage des charges .....	77
3.4.3	Débit .....	79
3.4.4	Nombre de hotspots .....	80
<b>3.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>81</b>
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>82</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>84</b>

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Comparaison entre WSN et WBAN .....	8
<b>Tableau 1.2</b> : Exemples des projets WBAN développés.....	14
<b>Tableau 1.3</b> : Avantages et inconvénients des topologies WBANs.....	17
<b>Tableau 1.4</b> : Caractéristiques de certains nœuds capteurs .....	22
<b>Tableau 1.5</b> : Caractéristiques des technologies sans fil utilisées dans les WBANs .	24
<b>Tableau 2. 1</b> : Protocoles à base de cluster.....	35
<b>Tableau 2. 2</b> : Protocoles Cross-layer pour WBANs.....	36
<b>Tableau 2. 3</b> : Protocoles à base de posture pour WBANs.....	39
<b>Tableau 2. 4</b> : Protocoles à base de QoS.....	40
<b>Tableau 2. 5</b> : Protocoles à base de température .....	61
<b>Tableau 3. 1</b> : Paramètres de simulation.....	74
<b>Tableau 3. 2</b> : Capteurs biomédicaux utilisés dans le modèle de simulation.....	74

## Liste des Figures

<b>Figure 1.1</b> : Réseau de capteurs sans fil.....	6
<b>Figure 1.2</b> : Domaines d'application des WSNs.....	7
<b>Figure 1.3</b> : Architecture à trois niveaux de WBAN .....	9
<b>Figure 1.4</b> : Domaines d'application des WBANs.....	11
<b>Figure 1.5</b> : Statistiques des populations âgées dans certains pays développés .....	12
<b>Figure 1.6</b> : Topologies des WBANs.....	16
<b>Figure 1.7</b> : Architecture d'un capteur .....	19
<b>Figure 1.8</b> : Capteurs biomédicaux et leurs utilisations .....	21
<b>Figure 1.9</b> : Positionnement de certains nœuds capteurs sur le corps humain .....	23
<b>Figure 1.10</b> : Caractéristiques des technologies utilisées par les WBANs .....	25
<b>Figure 2. 1</b> : Routage dans les WBANs .....	29
<b>Figure 2. 2</b> : Postures du corps humain .....	30
<b>Figure 2. 3</b> : Taxonomie des protocoles de routage des WBANs.....	34
<b>Figure 2. 4</b> : Techniques utilisées par la méthode de couches croisées .....	37
<b>Figure 2. 5</b> : Schéma de routage adopté par les protocoles à base de température....	42
<b>Figure 2. 6</b> : Exemple de fonctionnement de TARA .....	43
<b>Figure 2. 7</b> : Exemple de fonctionnement de LTR.....	45
<b>Figure 2. 8</b> . Exemple de fonctionnement de ALTR.....	46
<b>Figure 2. 9</b> . Exemple de fonctionnement de LTRT.....	47
<b>Figure 2. 10</b> : Diagramme d'estimation de fiabilité des nœuds de relais .....	55
<b>Figure 2. 11</b> : Exemple de fonctionnement du protocole TAR-SS.....	57
<b>Figure 3.1</b> : Routage à base de protocole SHR.....	66
<b>Figure 3.2</b> : Format du message HELLO.....	68
<b>Figure 3. 3</b> : Format du message d'acquittement .....	69
<b>Figure 3.4</b> : Organigramme du protocole HTTRP.....	70
<b>Figure 3. 5</b> : Modèle de consommation d'énergie .....	73
<b>Figure 3. 6</b> : Modèle de simulation.....	75
<b>Figure 3. 7</b> : Durée de vide de réseau TARA vs HTTRP.....	76

<b>Figure 3. 8 :</b> Pourcentage des paquets routés par les différents chemins .....	77
<b>Figure 3. 9 :</b> Diversification des chemins de TARA .....	78
<b>Figure 3. 10 :</b> Diversification des chemins de HTTRP .....	79
<b>Figure 3. 11 :</b> Débit de TARA vs HTTRP .....	80
<b>Figure 3. 12 :</b> Hotspots générés pendant la durée de vie du réseau .....	81

## Introduction générale

L'essor technologique de ces dernières années dans le domaine de la microélectronique et les communications sans fils ont permis l'émergence de nouvelles générations des capteurs intelligents de faible puissance de calcul et à autonomie limitée. Ces capteurs peuvent être attachés ou implantés dans le corps humain, ils sont utilisés pour surveiller en continue l'état physiologique du porteur de ces capteurs en mesurant les différents phénomènes physiologiques du corps humain tels que : la température, la pression artérielle, EEG (électroencéphalographie), ECG (électrocardiographie), etc. Les données mesurées seront ensuite transmises à un nœud de collecte appelé *Sink*. Le sink assure le traitement de ces données, il peut prendre des décisions ou envoyer via Internet des alertes au centre de surveillance à distance pour le stockage, le traitement et l'analyse. Ces capteurs peuvent être utilisés aussi pour suivre et prédire les mouvements du corps qui sont utiles pour les applications de réalité virtuelle, les jeux vidéo interactifs, le domaine sportif et pour détecter les chutes et les accidents. L'interconnexion de ces capteurs forme ce qu'on appelle les réseaux de capteurs sans fil corporels (Wireless Body Area Network *WBANs*) [1-3] qui sont un cas particulier des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks *WSNs*). Les *WBANs* ont un large éventail d'applications : la surveillance de la santé à distance, le militaire, la sécurité, les sports et les jeux.

L'utilisation des *WBANs* dans le domaine médical s'avère très bénéfique et peut réduire considérablement les coûts d'hospitalisation des patients. Elle peut minimiser le temps de présence du personnel médical notamment avec le taux ne cessant à augmenter des personnes âgées dans le monde notamment dans les pays développés [4]. Selon une étude de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [5], d'ici 2050, la population mondiale âgée 60 ans ou plus serait d'environ 2,1 milliards. Selon l'OMS, le nombre de décès à cause des maladies cardiovasculaires (MCV) était d'environ 17,9 millions en 2019 ce qui représente presque un tiers (31 %) des décès dans le monde [6]. De plus, selon l'OMS, plus de 422 millions de personnes souffrent de diabète. L'OMS estime que le diabète était la septième cause de décès en 2016 [7]. Ces maladies

et d'autres (comme le cancer, Parkinson, l'asthme, etc.) peuvent être évitées si elles sont détectées à temps. L'application de WBAN peut jouer un rôle très important dans la détection précoce de toutes ces maladies et par conséquent rendre les systèmes de soins de santé plus efficaces.

Cependant, la mise en place d'un WBAN est une tâche très délicate qui soulève beaucoup de défis, allant de développement de petits et légers appareils portables pour éviter d'être trop intrusifs dans le mode de vie des patients et surtout sans danger sur leur santé jusqu'à garantir la sûreté de leur fonctionnement et ce en assurant une communication sécurisée et efficace en ce qui concerne : la consommation d'énergie des nœuds, la prise en charge de la dynamique des nœuds induite par la mobilité du corps humain, la livraison de messages sans retards, etc. tout cela est assuré par les protocoles de communication (protocoles de routage), d'où la nécessité de développement de nouveaux protocoles de routage efficaces respectant ces exigences.

Plusieurs protocoles de routage pour les WBANs ont été proposés, ces protocoles sont classés dans cinq catégories [8, 9] qui sont : 1) à base de qualité de service (QoS-aware), 2) à base de cluster (cluster-based), 3) cross layer (cross-layered), 4) à base de posture (postured-based) et 5) à base de température (temperature-aware).

Les protocoles à base de température sont des protocoles spécifiques aux WBANs. Ils visent à réduire l'augmentation de température causée par l'activité des capteurs. Ces capteurs échangent des données entre eux à l'aide des ondes radio. Cette activité radio génère des champs électriques et magnétiques ce qui entraînera une augmentation de la température en raison de l'absorption du rayonnement de l'antenne. Ainsi la consommation électrique des circuits du nœud lors de leurs activités (faire les traitements des données captées) génère aussi la chaleur (par l'effet de joule), tout cela contribue à l'augmentation de la température [10]. Une élévation prolongée de la température dans les tissus corporels peut entraîner des lésions tissulaires, une réduction du flux sanguin dans certains organes et provoquer des réactions enzymatiques [11].

La dernière décennie et demie a connu le développement de dizaines de protocoles de routages à base de température. Ces protocoles permettent de réduire

l'augmentation de température en évitant de router les paquets à travers les nœuds chauds (*hotspots*). Cependant, la majorité de ces protocoles n'achèvent pas de bonnes performances en ce qui concerne la durée de vie du réseau. Cette lacune est due à la négligence de l'énergie des nœuds dans le choix des chemins de routage. Cette négligence cause un déséquilibre de charge entre les nœuds de réseau entraînant un épuisement rapide d'énergie de certains nœuds. Par conséquent c'est l'existence de réseau qui est influencée.

Une partie de notre travail dans cette thèse est consacré à faire une étude sur les WBANs en présentant l'architecture et les caractéristiques des nœuds capteurs ainsi que des systèmes WBANs. Nous abordons aussi leurs applications en montrant les avantages des WBANs dans le domaine médical tout en précisant les exigences et challenges pour les WBANs. Dans la deuxième partie, et afin de répondre en partie aux problèmes de routage dans les WBANs, nous avons présenté le routage dans les WBANs et les défis à relever, ensuite nous avons présenté les différentes classes des protocoles de routage en mettant l'accent sur les protocoles de routage à base de température où un état de l'art détaillé de ces protocoles est fourni.

Notre contribution principale est la proposition d'un nouveau protocole de routage à base de température pour les WBANs. Nous développons HTTRP (High Throughput and Thermal aware Routing Protocol), un algorithme de routage à base de température qui tient en considération l'énergie des nœuds lors de sélection des chemins de routage. La validation du protocole proposé est réalisée par simulation. Les résultats de simulation obtenus montrent que HTTRP permet de prolonger la durée de vie des biocapteurs en équilibrant leurs consommations d'énergie. Il augmente aussi le pourcentage des paquets acheminés tout en évitant la création des hotspots, tout cela est obtenu par son mécanisme de sélection des chemins de routage basé sur la température et l'énergie résiduelle des nœuds.

Cette thèse est organisée en trois chapitres abordant des sujets connexes. Après l'introduction générale, le chapitre I introduit les réseaux de capteurs corporels (Wireless Body Area Networks WBANs), nous présentons un aperçu général sur les WBANs, leur architecture, leurs domaines d'application, leurs topologies et les

technologies de communication qu'ils utilisent. Le chapitre II est consacré aux travaux antérieurs sur le routage dans les WBANs. Nous commençons par expliquer les challenges des protocoles de routages pour WBANs, puis nous présentons les différentes classes de ces protocoles tout en citant les caractéristiques des protocoles les plus connus de chaque classe. Nous accorderons plus d'attention aux protocoles à base de température en donnant des descriptions détaillées de chaque protocole de cette classe en focalisant sur les protocoles les plus connues proposés dans la littérature. Dans le chapitre III, nous décrivons notre contribution au problème de routage dans les WBANs, qui se porte sur la proposition d'un nouveau protocole de routage à base de température qui vise à assurer des bonnes performances en ce qui concerne la durée de vie du réseau et l'équilibrage de charge. Enfin, nous terminerons notre thèse par une conclusion générale.

# 1

## Généralités sur les Wireless Body Area Networks

### 1.1 Introduction

Ces dernières années ont connu un avancement technologique remarquable dans le domaine de la microélectronique qui a donné l'occasion à l'apparition des nouveaux capteurs biomédicaux miniaturisés de faible puissance et à faible coût. Ces capteurs ont permis l'émergence de nouvelle génération de réseaux de capteurs sans fil appelés les réseaux de capteurs sans fil corporels (Wireless Body Area Networks *WBANs*). Les *WBANs* sont considérés comme un cas particulier des réseaux de capteurs sans fil. Les *WBANs* sont utilisés dans plusieurs domaines (militaire, divertissement, santé ...etc.). Par exemple dans le domaine médical, *WBAN* utilise des capteurs miniaturisés qui sont portés ou implantés dans le corps humain pour surveiller des paramètres physiologiques comme la tension artérielle, la température corporelle, la fréquence cardiaque et le taux de glucose ce qui permet de déterminer le comportement ou l'état de santé d'un patient. L'utilisation de *WBAN* pour une surveillance continue et omniprésente des soins de santé peut considérablement réduire les dépenses médicales.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu général sur les *WBANs*, leur architecture, leurs domaines d'application, leurs topologies et les technologies de communication qu'ils utilisent.

## 1.2 Les réseaux WBANs vs les réseaux WSNs

### 1.2.1 Définition d'un WSN

Un réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network *WSN*) est composé d'un ensemble de capteurs communicants ; le nombre de capteurs peut varier entre quelques dizaines à des milliers. Ces capteurs sont de petite taille, ils sont dotés d'une source énergétique réduite. Un réseau de capteurs sans fil n'exige généralement aucune infrastructure, il est utilisé pour effectuer des tâches de collecte de données et de surveillance sur un terrain d'intérêt. Le déploiement des capteurs peut être d'une manière structurée ou d'une manière aléatoire dans une zone géographique appelée champ de captage ou zone de déploiement (Figure 1.1). Les données captées par les capteurs seront envoyées à l'aide d'une connexion sans fil vers un (ou plusieurs) point de collecte appelé station de base. le domaine d'application des WSNs est très large, il comprend le domaine de transports, de santé, d'agriculture de précision, les applications industrielles, la sécurité, la surveillance de l'environnement, ...etc. [12]. La Figure 1.2 montre les domaines d'application des WSNs.

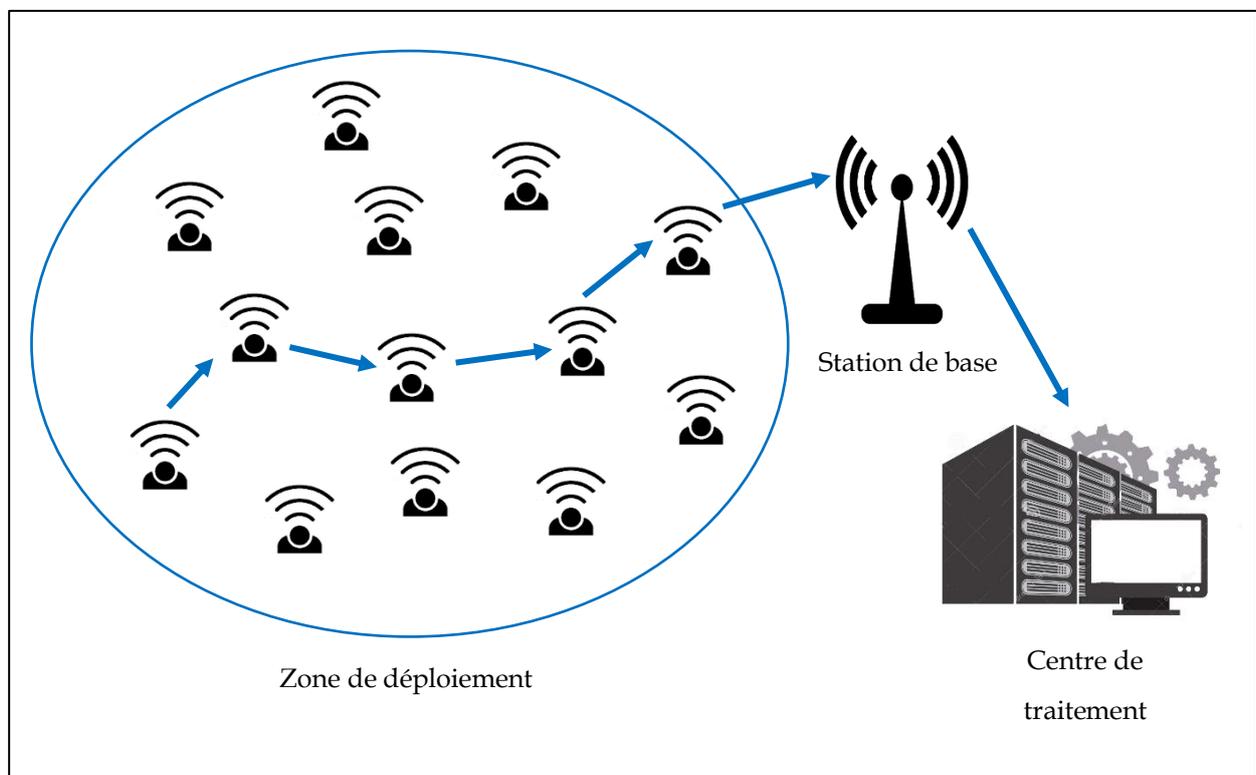


Figure 1.1 : Réseau de capteurs sans fil.

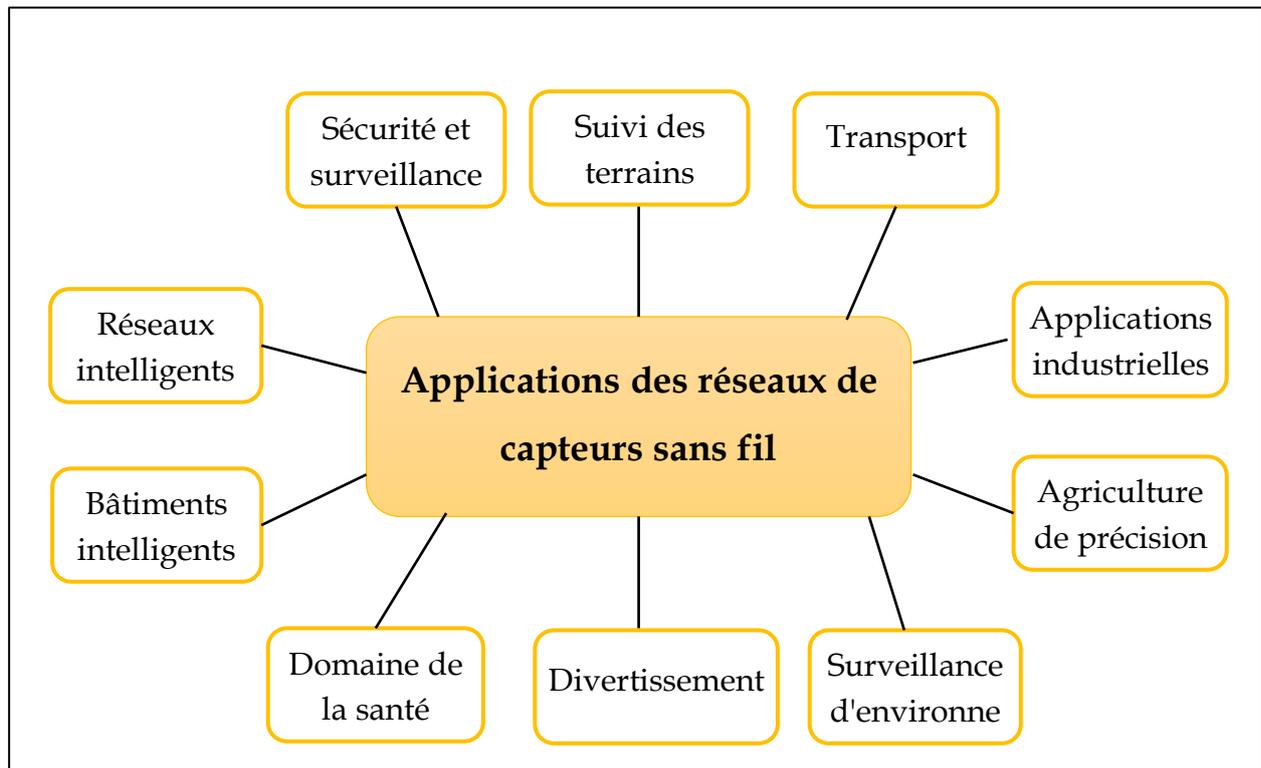


Figure 1.2 : Domaines d'application des WSNs.

### 1.2.2 Définition d'un WBAN

Un réseau de capteurs corporels sans fil (Wireless Body Area Network *WBAN*) [1-3] est un cas particulier des WSNs, il est constitué d'un ensemble de capteurs miniaturisés portés ou implantés sur le corps humain. Ces capteurs sont capables de prendre des mesures sur les caractéristiques physiologiques du corps humain ou sur son environnement. Ces données captées seront enregistrées puis envoyées à l'aide d'une connexion sans fil vers un dispositif central de traitement appelé *sink*. Le *sink* contrairement aux autres nœuds est connu par ses capacités élevées sur le plan énergétique et puissance de calcul.

### 1.2.3 Comparaison entre les réseaux WBANs et les réseaux WSNs

Malgré les ressemblances qui existent entre les WBANs et WSNs, plusieurs différences peuvent être identifiées entre les deux réseaux, le Tableau 1.1 résume les différences principales [13].

**Tableau 1.1** : Comparaison entre WSN et WBAN

Facteur	WSN	WBAN
Portée	Environnementale	Corps humain (cm/m)
Nombre de nœuds	Grand nombre, grande Couverture	Petit nombre, espace limité
Taille des nœuds	Petite taille préférée, mais pas nécessaire	Petite taille nécessaire
Fiabilité	Obtenue par la redondance des nœuds	Obtenue par la robustesse des nœuds
Remplacement des nœuds	Facile, certains nœuds sont jetables	Difficile pour les nœuds implantés
Topologie	Peu changeable	Très Changeable
Compatibilité biologique	Peu considérée	Indispensable
Technologies sans fil	Bluetooth, ZigBee, GPRS, WLAN...	Technologie à faible puissance requise
Standard	IEEE 802.11.4	IEEE 802.11.6

**Portée, nombre et taille de nœuds, fiabilité et le remplacement des nœuds** : dans les WSNs, les nœuds sont de petite taille ; généralement, ils sont déployés d'une façon aléatoire dans des zones qui ne sont pas facilement accessibles (voire hostile). On place un nombre important de nœuds (densité élevée) pour assurer la redondance afin de contourner les problèmes de défaillance des nœuds vu que leur remplacement n'est pas facile. Cependant, pour le cas des WBANs, les nœuds sont placés sur le corps humain (ou implantés sous le tissu) soigneusement dans des endroits étudiés. D'après le standard IEEE 802.15.6 [14], le nombre de nœuds dans un WBAN typique peut varier entre 6 et 256. Un seul WBAN peut impliquer un seul coordinateur et au maximum 64 nœuds. Étant donné que 2 à 4 WBANs peuvent coexister sur la même personne, un maximum de 256 nœuds peut exister par personne. Dans les WBANs, la fiabilité est assurée par la robustesse des nœuds ce qui exige une bonne gestion de leurs ressources. La défaillance d'un nœud n'est pas tolérée, donc en cas de défaillance (ou épuisement d'énergie) on procède directement à son remplacement.

**Topologie** : dans les WSNs, habituellement les nœuds ne sont pas mobiles et ils sont considérés comme des stationnaires. Pour cela, la topologie des WSNs est inchangeable. Par contre dans le cas des WBANs, les personnes portant des capteurs peuvent se déplacer (par exemple changement de posture des mains) et par conséquent les nœuds capteurs sont des nœuds mobiles.

**Compatibilité biologique, Technologies sans fil et standard :** La plupart des réseaux WSNs sont utilisés pour surveiller des événements, où la compatibilité biologique est très peu considérée. Les technologies sans fil utilisées pour les WSNs sont Bluetooth, ZigBee, GPRS, WLAN...etc. la norme standard pour les WSNs est le standard IEEE 802.11.4. Cependant, les WBANs sont utilisés pour mesurer des valeurs physiologiques de l'être humain, en d'autres termes, un WBAN est mis en place directement sur le corps humain, ce qui exige une forte compatibilité biologique. En outre, la technologie sans fil à utiliser doit être à faible puissance. La norme standard pour les WBANs est le standard IEEE 802.11.6 [14].

### 1.3 Architecture de communication des WBANs

Un réseau WBAN de surveillance médicale est composé de 3 niveaux (Figure 1.3). Dans le premier niveau, on trouve les capteurs biomédicaux qui sont fixés ou implantés dans le corps. La fonction principale de ce premier niveau est de collecter les données physiologiques sur le corps humain et de les transmettre au niveau 2 par le biais d'une connexion sans fil.

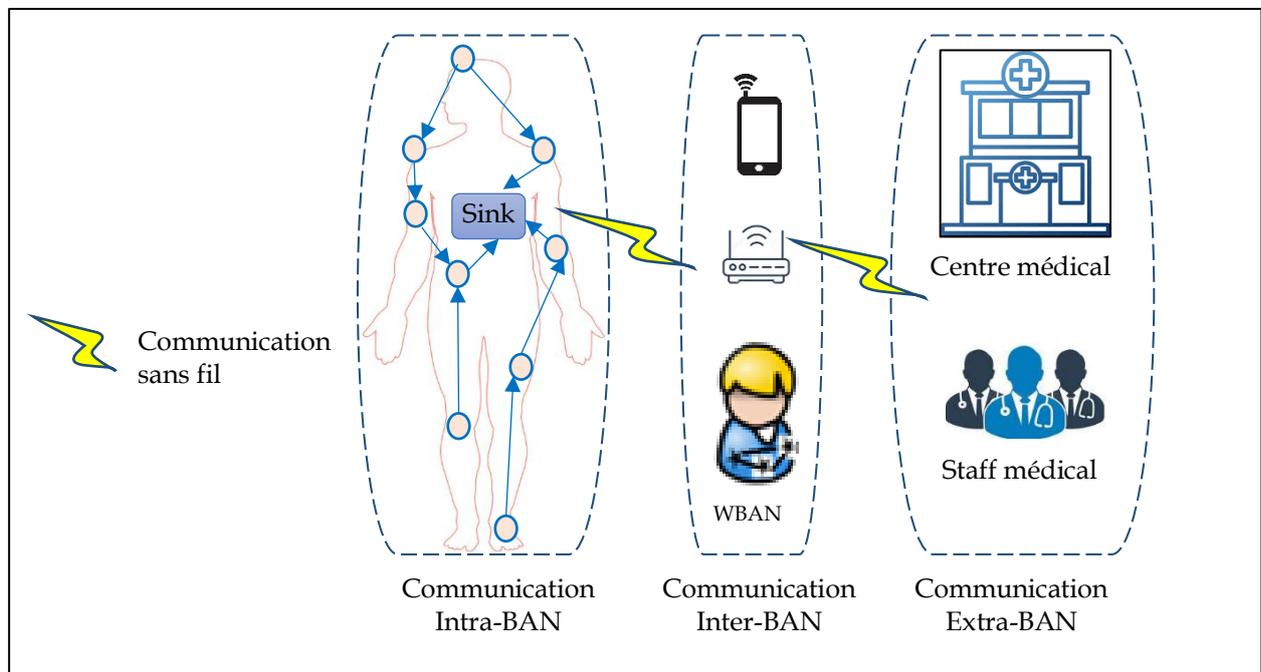


Figure 1.3 : Architecture à trois niveaux de WBAN

Dans le niveau 2, on trouve des téléphones intelligents, des ordinateurs personnels ou d'autres appareils électroniques intelligents. Ce niveau joue le rôle d'un relai entre le premier niveau et le troisième niveau, en d'autres termes, il reçoit les données envoyées en mode sans fil par les capteurs et les transmet au centre médical via Internet par exemple. Le troisième niveau correspond au centre médical dans lequel se trouve l'équipe médicale (médecins et autres personnelles) chargée à rassembler et analyser les données reçues. Les données mesurées peuvent être sujet d'un diagnostic en temps réel. En cas de réception des données critiques, l'équipe médicale peut effectuer une intervention d'urgence, ce qui peut accélérer le traitement, et même sauver la vie du patient.

Comme il est présenté dans la Figure 1.3, on peut classer un système WBAN en 3 niveaux principaux :

### **1.3.1 Le niveau Intra-BAN**

La communication à ce niveau concerne l'échange de différents types d'information entre les capteurs biomédicaux portés ou implantés sur le corps humain et l'unité de collecte (*Sink*). Le sink est le nœud central dans l'intra-BAN, il est doté de fortes ressources en matière d'énergie et de puissance de calcul. La tâche principale du sink est de recevoir les données mesurées de la part des capteurs et de les transmettre au niveau Inter-BAN.

### **1.3.2 Le niveau Inter-BAN**

La communication à ce niveau concerne l'échange d'informations entre le sink et un ou plusieurs points d'accès situés à son entourage. Les points d'accès peuvent être déployés dans le cadre de l'infrastructure. La communication dans ce niveau peut être réalisé en utilisant une technologie différente de celle mise en œuvre dans le niveau Intra-BAN (Wifi, Bluetooth...).

### **1.3.3 Le niveau Extra-BAN**

La communication à ce niveau concerne l'échange d'information entre les points d'accès et le serveur distant (l'équipe médicale), cette communication est assurée via

Internet ou les réseaux cellulaires. C'est cette communication qui permet à l'équipe médicale (médecins ou autres personnels) d'interagir avec les patients.

## 1.4 Domaines d'application des WBANs

La facilité de mise en place d'un WBAN sur le corps humain et le cout de plus en plus faible des capteurs, ainsi que la diversité des capteurs disponibles ont permis au WBAN d'envahir plusieurs domaines d'applications (Figure 1.4). En fait, on trouve les WBANs dans les soins médicaux omniprésents, l'armée, le sport, le divertissement et de nombreux autres domaines où les êtres humains sont impliqués. Nous pouvons résumer les applications des WBANs dans les domaines suivants [12].

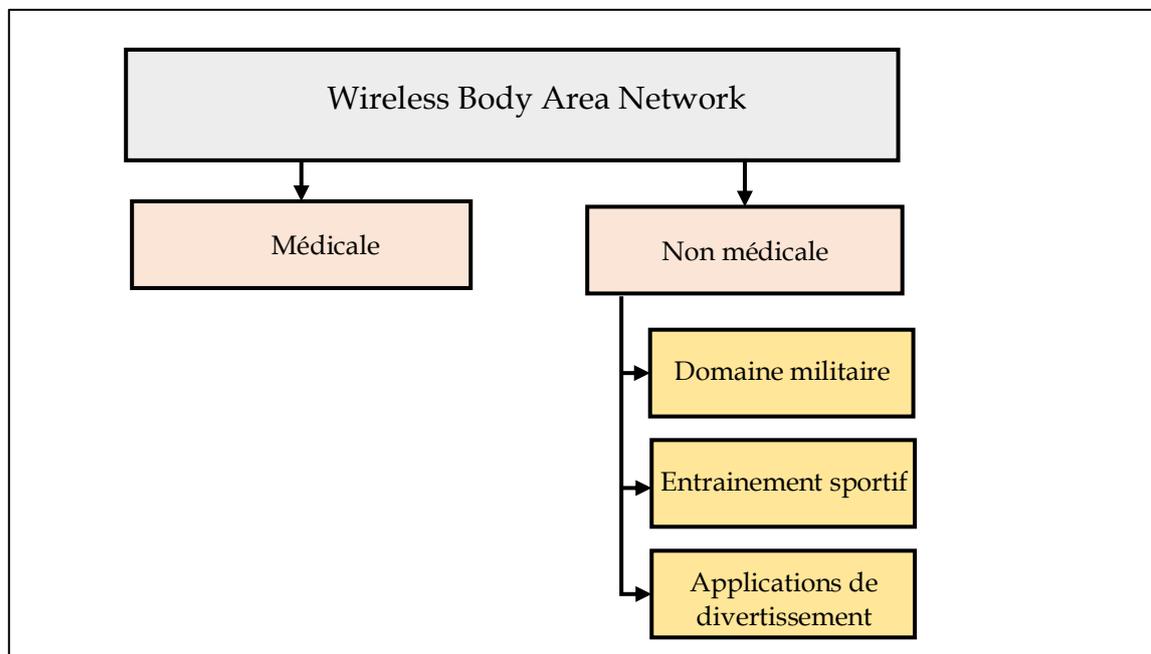


Figure 1.4 : Domaines d'application des WBANs

### 1.4.1 Domaine médical

L'utilisation des WBANs dans le domaine médical englobe la détection précoce des maladies, la surveillance médicale, le retour d'information postopératoire et l'assistance médicale sont quelques exemples des applications courantes des WBANs dans les soins médicaux. Selon une étude de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) [5], d'ici 2050, la population mondiale âgée 60 ans ou plus serait d'environ 2,1 milliards. Cette augmentation du nombre de personnes âgées soulèvera davantage les problèmes de santé. Selon l'OMS, le nombre de décès causés par des maladies cardiovasculaires

(MCV) était d'environ 17,9 millions en 2019 ce qui représente presque un tiers (31 %) des décès dans le monde [6]. De plus, selon l'OMS, plus de 422 millions de personnes souffrent de diabète. L'OMS estime que le diabète était la septième cause de décès en 2016 [7]. Les dégâts de ces maladies et d'autres (comme le cancer, Parkinson, l'asthme, etc.) peuvent être évitées si elles sont détectées à temps. L'application de WBAN peut jouer un rôle très important dans la détection précoce de toutes ces maladies et par conséquent rendre les systèmes de soins de santé plus efficaces. La Figure 1.5 donne des statistiques montrant le pourcentage des personnes âgées dans certains pays développés.

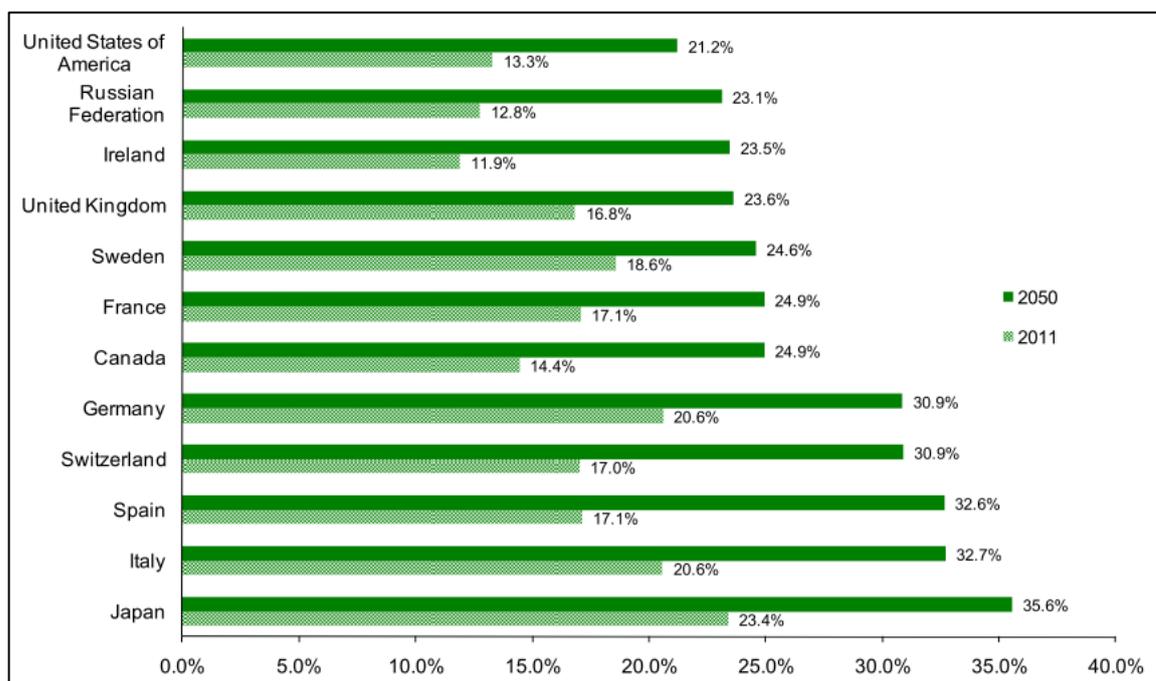


Figure 1.5 : Statistiques des populations âgées dans certains pays développés [4]

## 1.4.2 Domaine non médical

En plus du domaine médical, les WBANs ont créé leur place dans divers domaines et les applications WBANs ont connu une large portée. On trouve les WBANs dans les domaines suivants :

### 1.4.2.1 Domaine militaire

L'utilisation des WBANs dans le domaine militaire peut être très bénéfique. Un soldat peut être victime de la fatigue physique ou mentale ainsi que de blessures ; dans ce cas, il ne peut pas maintenir ses meilleures performances physiques. Ces problèmes

peuvent être évités en utilisant un WBAN pour observer les performances des soldats pendant l'entraînement ou sur les champs de bataille, et le cas échéant, on procède à leurs remplacements. Le WBAN peut être utilisé pour surveiller par exemple le niveau de substances toxiques dans l'air et avertir les soldats si un niveau mortel est détecté. Cela peut également être mis en œuvre lors des sessions de formation des forces de police, des pompiers et des équipes de gestion des catastrophes. En outre, à l'aide des capteurs de mouvement et les capteurs d'acide lactique, on peut mesurer les performances des individus. En se basant sur ces mesures, on peut donner de repos à ceux fatigués en effectuant des remplacements, ce qui permet d'obtenir de meilleures performances [15].

#### **1.4.2.2 Entraînement sportif**

Les WBANs sont utilisés dans le domaine de l'entraînement sportif et ils ont contribué à obtenir de meilleurs résultats. Pendant les séances d'entraînement, on procède à l'enregistrement des performances des joueurs ou des athlètes, ces enregistrements seront utilisés pour déterminer les performances en établissant des profils pour chaque joueur. Ces profils seront utilisés pour aider les directeurs sportifs à choisir les bons joueurs ou athlètes selon les différentes situations.

#### **1.4.2.3 Applications de divertissement**

En plus des applications citées précédemment, un WBAN peut inclure des appareils tels qu'un lecteur MP3, des écrans (ordinateur) montés sur la tête, un microphone, une caméra, des interfaces homme-machine avancées telles qu'une interface neuronale, etc.[16]. Le WBAN peut également être utilisé à des fins de jeu et en réalité virtuelle où le contrôle de jeu est fait avec les gestes de la main et les mouvements corporels. Par exemple, l'avatar d'un monde virtuel prend les positions réelles du joueur grâce aux capteurs de mouvement qui l'équipent.

Le tableau 1.2 tiré de [2] résume certains projets WBAN développés dans de différents domaines.

**Tableau 1.2 :** Exemples des projets WBAN développés

<b>Author/Reference</b>	<b>Domaine</b>	<b>Description</b>
Grimes, et al [17], 1999		Un système de surveillance sanitaire a été développé pour mesurer la température et le glucose du patient à l'aide de capteurs magnétoélastiques.
Ziaie and Najafi [18], 2001	<b>Système médical</b>	Un système de surveillance sanitaire a été développé pour mesurer la pression artérielle tonométrique par un capteur de pression artérielle implantable.
Khurana, et al. [19], 2003		Un système de surveillance sanitaire a été développé pour surveiller le niveau de glucose pour les patients diabétiques par un capteur de glucose chimique.
Lorincz, et al.[20], 2004		Un célèbre projet de recherche sur les soins de santé (CodeBlue) a été réalisé à Harvard. Dans ce projet, de nombreux biocapteurs sont installés sur le corps du patient. Ces biocapteurs détectent puis transmettent les données physiologiques à l'appareil de l'utilisateur final (ordinateurs portables, PDA ou ordinateur personnel) via une connexion sans fil pour une analyse plus approfondie.
Lo, et al. [21], 2005		Un système de surveillance sanitaire a été développé pour mesurer l'ECG en utilisant la fusion de données multicapteurs (ECG à 3 dérivations, bande d'ECG à 2 dérivations et des capteurs SpO2).
Wood, et al. [22], 2006		Un système de surveillance sanitaire des patients (Alarm-net) a été développé à l'université de Virginie. Ce système comprend des réseaux de capteurs environnementaux et de capteurs corporels. Ce système est utilisé pour aider le réseau à sécuriser les données relatives aux paramètres de l'environnement, la physiologie et le comportement des résidents.
Borges, et al. [23], 2008		Un système de surveillance sanitaire a été développé pour surveiller les mouvements du fœtus pendant la grossesse.
Lee, et al. [24], 2015		Un système d'acquisition et de classification des signaux biologiques de faible puissance a été développé pour mesurer l'ECG. Ce système se compose de trois blocs principaux: un processeur de signal biologique, un émetteur-récepteur à clé On-Off et un processeur de signal numérique.

Author/Reference	Domaine	Description
<b>Les projets WBAN dans le domaine non médical</b>		
Roessler, et al. [25]	<b>Militaire ou autodéfense</b>	Un WBAN a été développé pour les aveugles (avec dégénérescence rétinienne) et utilise la technologie d'implant visuel pour récupérer la perception visuelle.
Vutinuntakasame, et al. [26], 2011		Un gant basé sur le geste de la main a été développé pour faciliter la communication entre les personnes souffrant de troubles de l'audition et de la parole.
Burchfield and Venkatesan [27], 2010	<b>Domaine de sport</b>	Un système d'entraînement au golf a été développé pour aider les joueurs de golf en leur donnant des instructions.
Benito -Lopez, et al. [28], 2010		Un système de surveillance de l'hydrogène potentiel (PH) a été développé pour mesurer le niveau de transpiration en temps réel par des codes-barres, positionnés sur le corps humain.
Lloret, et al. [29], 2016		Un WBAN a été développé pour surveiller les joueurs de l'équipe de football. Dans lequel chaque joueur est doté d'un WBAN utilisant la récupération d'énergie et chaque joueur agit comme un nœud dans le WSN.
Tamura, et al. [30], 2009		Un système de détection des chutes a été développé pour éviter les blessures graves causées par les chutes en tenant compte de la vitesse angulaire et de l'accélération.

## 1.5 Topologies des réseaux WBAN

Un réseau WBAN est déployé sur le corps humain selon les quatre topologies suivantes : point à point, étoile, maille et arbre [13] comme illustré par la Figure 1.6. Dans ce qui suit, nous décrivons ces topologies.

### 1.5.1 Topologie point à point

Dans cette topologie, il y a une liaison directe entre deux points qui peuvent être un nœud capteur et le sink. Cette liaison peut être permanente ou temporaire. Son avantage majeur est sa simplicité et la non-complexité du protocole de connexion utilisé, ainsi cette topologie assure un débit élevé avec une faible latence. Par contre, l'inconvénient majeur de cette topologie est sa faible couverture.

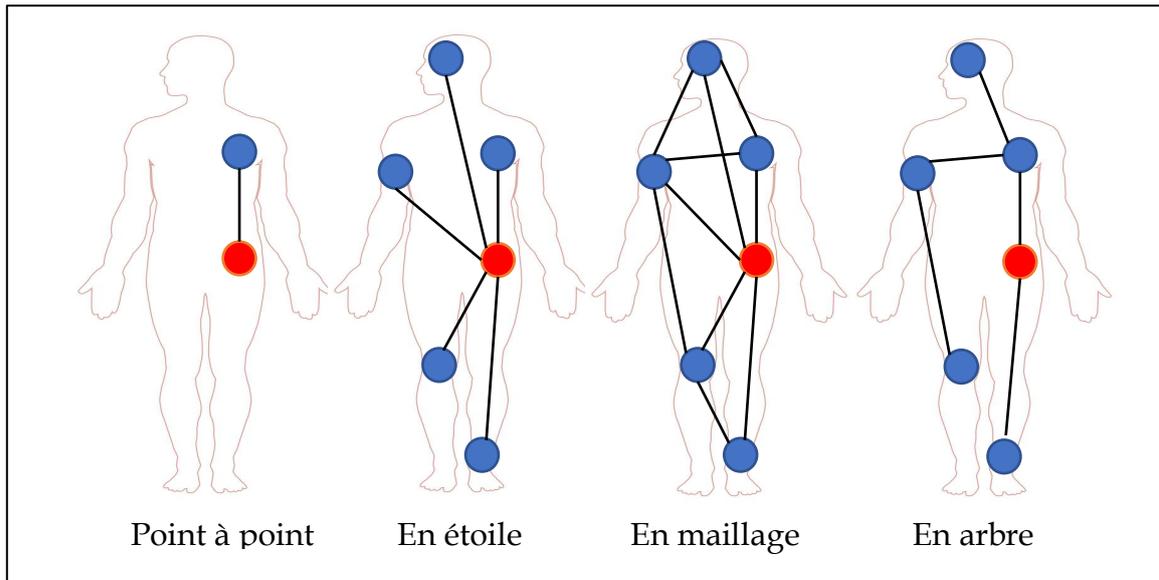


Figure 1.6 : Topologies des WBANs

### 1.5.2 Topologie en étoile

Cette topologie consiste en un nœud central (sink) auquel chaque nœud du WBAN est connecté. Tout le trafic de données passe par le nœud central ; par conséquent, un nœud central suffisamment puissant est requis. Cette topologie est facile à concevoir, implémenter et étendre. C'est la topologie la plus proposée et la plus utilisée pour les WBANs. L'inconvénient majeur de cette topologie est la vulnérabilité du nœud central, s'il tombe en panne, aucune connexion n'est possible.

### 1.5.3 Topologie en maille

Dans cette topologie, les nœuds diffusent leurs propres données et servent également de relais pour propager les données des autres nœuds. Il existe deux formes de topologie de maillage : le maillage partiellement connecté, dans lequel certains nœuds sont connectés à plus d'un autre nœud et le maillage entièrement connecté, dans lequel chaque nœud est connecté à tous les autres nœuds du réseau. Généralement, les WBANs utilisent le maillage partiel. L'avantage de cette topologie réside dans sa flexibilité et sa possibilité de passer à l'échelle. Tandis que l'inconvénient majeur de cette topologie est la latence créée par le passage des messages à travers plusieurs nœuds avant d'arriver au nœud destinataire.

### 1.5.4 Topologie en arbre

Dans cette topologie, les nœuds sont structurés en hiérarchie, où le nœud le plus haut est appelé « nœud racine ». Ce nœud est connecté à un ou plusieurs nœuds du niveau ci-dessous, comme le montre la Figure 1.6. Chaque nœud peut être un fils à un nœud de niveau supérieur et un père d'un nœud de niveau inférieur. Cette topologie est évolutive et sa structure simple facilite l'identification et l'isolement des défauts. Cependant, les nœuds pères peuvent consommer beaucoup d'énergie.

Le Tableau 1.3 résume les avantages et les inconvénients de chacune des topologies décrites ci-dessus.

**Tableau 1.3 :** Avantages et inconvénients des topologies WBANs

Topologie	Avantages	Inconvénients
Point à point	Simplicité de mise en œuvre	Fonctionnalités limitées Faible couverture
	Faible latence	
	Débit élevé	
En étoile	Simplicité	Vulnérabilité du nœud central
	Faible consommation d'énergie	
	Faible latence Bande passante élevée	
En maillage	Flexibilité	Consommation d'énergie importante Latence élevée
	Tolérance aux fautes	
	Bonne couverture Évolutive	
En arbre	Bonne tolérance aux fautes	Consommation d'énergie élevée chez les pères
	Bonne couverture	
	Faible latence	
	Bande passante élevée Évolutive	

## **1.6 Les capteurs**

Un réseau WBAN se compose de plusieurs appareils hétérogènes qui peuvent être des capteurs, des actionneurs et des appareils personnels. Dans cette section, nous allons donner un aperçu sur les différents types d'appareils utilisés dans un WBAN, l'architecture des capteurs et des exemples des capteurs utilisés dans les WBANs.

### **1.6.1 Types d'équipements**

#### **1.6.1.1 Définition d'un capteur médical sans fil**

Un capteur (parfois appelé senseur ou biocapteur) est un appareil capable de recueillir des données correspondantes à des activités physiologiques de l'homme ou à des actions du corps humain, de traiter ces données et de les transmettre par une connexion sans fil. Un capteur se compose d'un émetteur-récepteur radio, une unité d'alimentation, un processeur et une mémoire [13].

#### **1.6.1.2 Définition d'un actionneur sans fil**

C'est un dispositif qui agit en fonction des données reçues des capteurs ou par une intervention extérieure (par le médecin par exemple). Les composants d'un actionneur sont similaires à ceux du capteur sauf qu'il est doté d'un matériel de commande (par exemple un réservoir destiné à contenir le médicament et le matériel pour gérer ce médicament). L'actionneur est un composant actif, il pourra par exemple délivrer sur commande une substance médicamenteuse. Cette action peut avoir lieu à un moment préfixé, ou sous l'influence d'une source externe (par exemple un médecin qui analyse les données). Elle peut être même réalisée en temps réel si le capteur révèle un problème. Par exemple, on utilise un actionneur pour régler le taux d'insuline sur un diabétique. L'actionneur suite à une instruction, injecte l'insuline dans le corps du malade, l'instruction peut être une information lue par un capteur ou une instruction envoyée par le médecin via une connexion sans fil.

#### **1.6.1.3 Définition d'appareil personnel sans fil**

L'appareil personnel sans fil correspond au sink. Il rassemble toutes les informations acquises par les capteurs et les actionneurs, puis les transmet via une passerelle sans fil au centre de commandement du WBAN (médecin, infirmière par exemple). Dans

certaines implémentations, un assistant numérique personnel (PDA) ou un téléphone intelligent est utilisé.

### 1.6.2 Architecture d'un capteur

Un capteur est composé essentiellement de quatre unités de base où chaque unité assure une tâche particulière. L'unité d'acquisition, l'unité de traitement, l'unité de transmission de données et l'unité énergétique. Selon le cas, le capteur peut comporter aussi des unités supplémentaires, comme l'unité de localisation (GPS), un générateur énergétique et une unité mobilisatrice. La Figure 1.7 montre l'architecture typique d'un capteur [31].

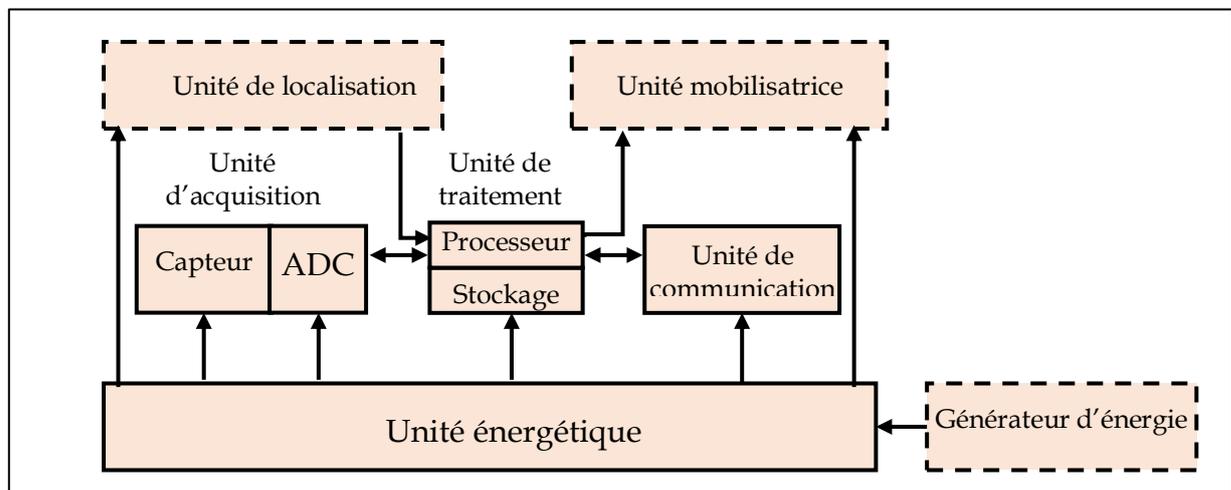


Figure 1.7 : Architecture d'un capteur

**L'unité d'acquisition (ou de captage) :** l'unité d'acquisition est composée généralement de deux sous-modules : le capteur lui-même et un convertisseur analogique-numérique ADC (Analog-to-Digital Converter). Le capteur produit des signaux analogiques sur la base du phénomène observé puis c'est à l'ADC de les convertir en signaux numériques exploitables. Par la suite, ces signaux numériques sont introduits dans l'unité de traitement.

**L'unité de traitement :** elle est composée d'une unité de stockage des données collectées, et d'un processeur pour traiter les données et contrôler les procédures permettant au capteur de collaborer avec les autres nœuds pour effectuer les tâches d'acquisition.

**Unité de communication :** elle est composée d'un émetteur/récepteur sans fil permettant au capteur de communiquer avec les différents nœuds du réseau.

**L'unité énergétique :** elle est souvent sous forme de batterie (généralement non rechargeable). C'est cette unité qui assure le fonctionnement du capteur en alimentant les autres unités. C'est l'unité la plus critique vu sa capacité limitée, toute conception d'un protocole doit la prendre en considération.

### 1.6.3 Exemples des capteurs médicaux utilisés dans les WBANs

Un WBAN utilise plusieurs types de capteurs. Ces capteurs, comme montré sur la Figure 1.8, sont utilisés pour mesurer les signes vitaux, pour détecter les mouvements du corps humain et pour surveiller l'environnement autour de corps humain [32]. Dans cette section, nous décrivons quelques types de capteurs médicaux commercialisés [33-35].

#### 1.6.3.1 Capteurs de mesure des signes vitaux

##### Capteur ECG

Un ECG (ElectroCardioGraphie), illustré sur la **Figure 1.8(i)**, permet de découvrir toute anomalie cardiaque en mesurant les signaux électriques produits par le cœur. Ces signaux sont émis par le muscle cardiaque. Il permet de suivre et d'enregistrer l'activité cardiaque (rythme cardiaque, intervalle entre deux battements) en interceptant l'activité électrique.

##### Capteur EEG

Un EEG (Electro-EncéphaloGraphie) permet de mesurer l'activité électrique du cerveau par des électrodes placées sur le cuir chevelu. Un EEG trace un encéphalogramme représentant l'activité neurophysiologique du cerveau au cours du temps.

##### Capteur de Glycémie

Il permet de mesurer la concentration de glucose dans le sang. Un glucomètre est utilisé pour analyser et évaluer le taux de glucose.

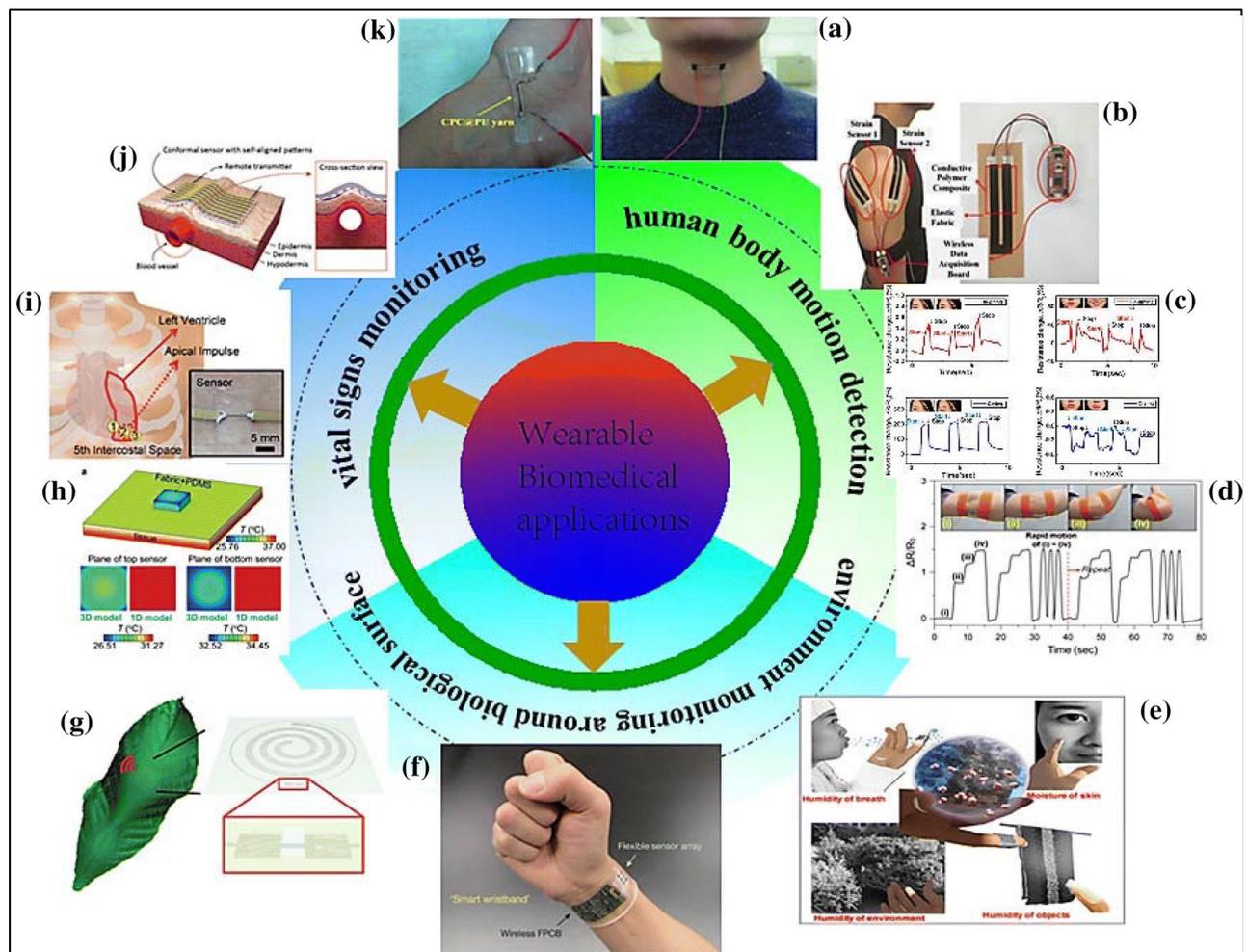


Figure 1.8 : Capteurs biomédicaux et leurs utilisations [32]

#### Capteur de tension artérielle

Il permet de mesurer la tension artérielle. En d'autres termes, il mesure la force exercée par le sang contre les parois des vaisseaux sanguins (Figure 1.8(j)).

#### Capteur de gaz CO<sub>2</sub>

Ce capteur, montré sur la figure Figure 1.8 (e,g), permet de mesurer le niveau de dioxyde de carbone gazeux (CO<sub>2</sub>). Il est utilisé pour surveiller la concentration d'oxygène lors de la respiration humaine.

#### Capteur EMG

La Figure 1.8(d) montre un capteur EMG (ÉlectroMyoGramme) qui permet d'enregistrer l'activité électrique d'un muscle ou d'un nerf. L'EMG mesure les signaux d'électromyographie produits par les muscles pendant la contraction ou pendant le repos.

### 1.6.3.2 Capteurs de détection des mouvements du corps humain

#### Accéléromètre et Gyroscope

L'accéléromètre et le gyroscope, illustrés sur **Figure 1.8(b)**, sont deux capteurs utilisés pour surveiller les mouvements physiques. L'accéléromètre permet de connaître la posture du corps (debout, assis, en marche ou courir). Pour mesurer la posture d'un corps, on utilise trois (3) accéléromètres triaxiaux placés sur des endroits stratégiques du corps humain. Cependant, le Gyroscope est utilisé pour mesurer et maintenir l'orientation.

### 1.6.3.3 Capteurs de surveillance de l'environnement autour de corps humain

#### Capteurs de la transpiration

Ce capteur de transpiration, montré sur la **Figure 1.8(f)**, permet de mesurer les métabolites et les électrolytes dans la sueur. Il mesure également la température de la peau.

#### Capteurs de température et d'humidité

La **Figure 1.8Erreur! Source du renvoi introuvable.(h)** illustre le capteur de température qui permet de mesurer la température du corps humain ou de l'environnement entourant le patient. Cependant, le capteur d'humidité permet de mesurer l'humidité de l'environnement entourant le patient. Tous les deux peuvent émettre une alarme si les valeurs captées sont anormales.

Le Tableau 1.4 montre les caractéristiques techniques de certains nœuds capteurs.

**Tableau 1.4 :** Caractéristiques de certains nœuds capteurs [36]

Capteur	Débit maximum	Bande passante (HZ)	Précision (Bits)	Délai de bout en bout maximum (s)	Priorité	Modèle de données
Température	24 bps	0-1	12	60	Faible	Streaming
Pression artérielle	1.41 kbps	25-60	12	10	Élevée	Rafale
Spo2	0.70 kbps	0-30	12	30	Moyenne	Streaming
Rythme cardiaque	0.12 kbps	0.4-5	12	5	Élevée	Streaming
Fréquence respiratoire	0.23 kbps	0.1-10	12	5	Élevée	Streaming

Capteur	Débit maximum	Bande passante (HZ)	Précision (Bits)	Délai de bout en bout maximum (s)	Priorité	Modèle de données
ECG (par piste)	4.91 kbps	0.01-125	16	5	Élevée	Diffusion
EEG (par piste)	3.52 kbps	0.5-125	12	6	Élevée	Streaming épisodique
EMG (par piste)	313 kbps	0-10000	16	15	Moyenne	Streaming épisodique
Glucose sanguin	1.56 kbps	0-50	16	5	Élevée	Streaming épisodique
Accéléromètre	3.52 kbps	0-50	12	5	Élevée	Streaming épisodique
Gyroscope	3.52 kbps	0-50	12	5	Élevée	Streaming épisodique
Gaz CO2	16 bps	0-1	8	5	Élevée	Rafale
Présence	16 bps	0-1	8	5	Faible	Rafale
Vidéo	1 Mbps	-	-	5	Moyenne	Streaming

La Figure 1.9 montre l'emplacement typique de certains capteurs sur le corps humain.

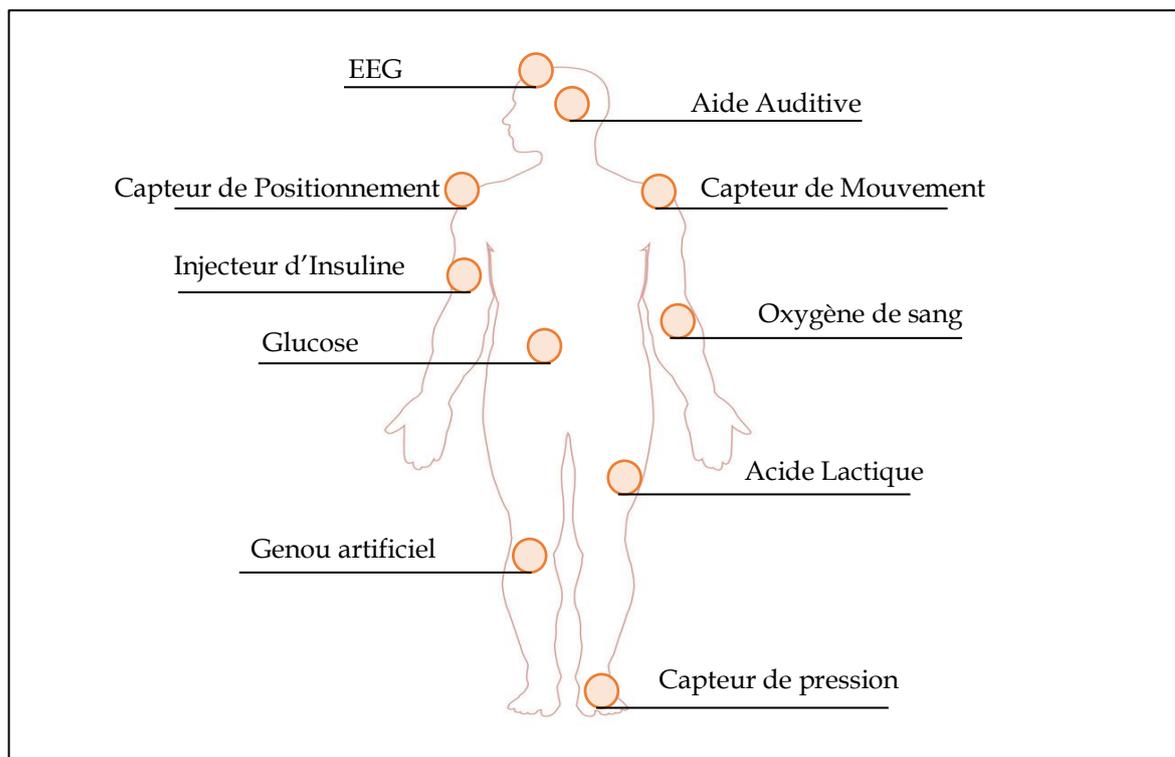


Figure 1.9 : Positionnement de certains nœuds capteurs sur le corps humain

### 1.6.1 Systèmes d'exploitation des capteurs

Le système d'exploitation pour un capteur joue le rôle d'interface entre les ressources matérielles et les applications distribuées. Un capteur est doté généralement de certaines ressources matérielles très limitées ; un processeur (microcontrôleur) de faible vitesse de traitement, une ressource énergétique très limitée et une mémoire de petite capacité. Le but du système d'exploitation est de faciliter la programmation des applications, mais aussi d'optimiser l'usage des ressources matérielles. De nombreux systèmes d'exploitation spécialement développés pour les capteurs existent, parmi lesquels on cite : TinyOS, ContikiOS, MantisOS, Nano-RK, LiteOS [37].

## 1.7 Technologies de communication des WBANs

Le WBAN est mis en œuvre en utilisant diverses technologies à courte portée assurant l'échange de données entre les différents nœuds du réseau et la passerelle, elles sont utilisées dans les communications intra-WBAN. Ces technologies englobent entre autres Bluetooth, Bluetooth Low Energy, ZigBee et IEEE 802.15.6. Chacune de ces technologies est à courte portée et possède une variété de caractéristiques en ce qui concerne les fréquences de fonctionnement, la topologie de réseau, le débit et la consommation d'énergie. Le Tableau 1.5 résume les caractéristiques des technologies sans fil utilisées dans les WBANs, tandis que la Figure 1.10 montre les débits par rapport à la consommation d'énergie de ces technologies. Concernant la communication entre la passerelle et le serveur, elle est assurée par les technologies de communication à longue portée comme : WiMax, LTE et LTE-Advance. Dans cette section, nous nous concentrons sur certaines technologies à courte portée qui peuvent être utilisées dans les WBANs.

**Tableau 1.5 :** Caractéristiques des technologies sans fil utilisées dans les WBANs [3, 38]

Technologie	Fréquence de fonctionnement	Débit	Couverture	Topologie
Bluetooth V.1 802.15.1	2.4 GHz	ISM 780 Kbps	10~100	Étoile
ZigBee	784, 868, 915 MHz et 2.4 GHz ISM 20	20 Kbps à 250 Kbps	10~100	Étoile, Maille, Arbre
IEEE 802.15.4	868 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz	20 Kbps à 250 Kbps	< 100 m	Star, Maille, Arbre
IEEE 802.15.6	400, 800, 900 MHz   2,3~2,4   3,1~11,2 GHz	75,9 Kbps à 15,6 Mbps	<10 m	Étoile (1 ou 2 sauts)

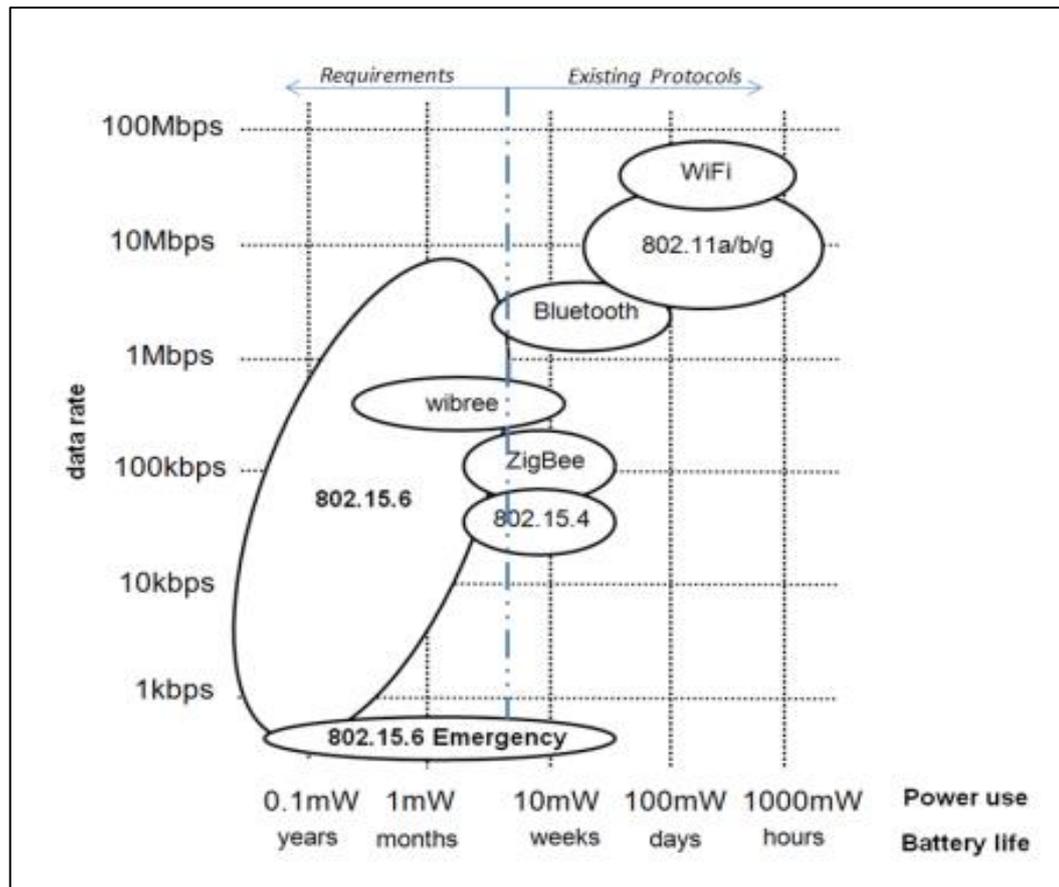


Figure 1.10 : Caractéristiques des technologies utilisées par les WBANs [39]

### 1.7.1 Bluetooth

Bluetooth est une technologie à courte portée, il fonctionne dans la bande de fréquences 2,4 GHz et la plage de fonctionnement typique est de 10 à 100 m ce qui le rend un choix possible pour mettre en œuvre un WBAN. Bluetooth offre des débits de données élevés, il fonctionne sur 79 canaux de 1 MHz chacun. Cependant, Bluetooth consomme beaucoup d'énergie, donc il n'est pas idéal pour les applications WBAN. De plus, la technologie Bluetooth fonctionne comme une topologie en étoile, où un maître et sept esclaves forment le réseau. Cette limitation implique que seulement sept esclaves peuvent être actifs à la fois, ce qui met un seuil sur le nombre maximum de nœuds à utiliser dans le réseau WBAN [3].

### **1.7.2 ZigBee**

La technologie ZigBee<sup>1</sup> est l'une des technologies de réseau sans fil largement utilisées et adoptées par des applications qui nécessitent un faible débit de données et une longue durée de vie de la batterie, ce qui la rend très utilisée pour les applications WBAN. ZigBee prend en charge un débit de données variable allant de 20 Kbps à 250 Kbps. Il fonctionne sur 16 canaux sur la bande ISM 2,4 GHz (250 Kbps), sur 10 canaux sur les bandes 915 MHz (40 Kbps) et sur un seul canal sur les bandes 868 MHz (20 Kbps) [3]. L'inconvénient majeur de ZigBee pour les applications WBAN est dû aux interférences avec la transmission WLAN, en particulier dans la bande 2,4 GHz, où de nombreux systèmes sans fil fonctionnent. Un autre inconvénient est lié à son faible débit de données, ce qui le rend inapproprié pour les applications WBAN en temps réel, en particulier dans les soins de santé.

### **1.7.3 IEEE 802.15.4**

IEEE 802.15.4 [40] est un système de communication à courte portée (jusqu'à 100 m) destiné aux applications WBAN qui ne mettent pas des exigences en matière de débit et de latence. Les principales caractéristiques de l'IEEE 802.15.4 sont : une faible complexité, un faible cout, une faible consommation d'énergie et une transmission à faible débit. Cette technologie est principalement utilisée pour la mise en œuvre des WSNs. Les topologies de réseau prises en charge sont l'étoile, l'arabe et le maillage. IEEE 802.15.4 spécifie un total de 27 canaux semi-duplex sur trois bandes de fréquences; la bande 868 MHz avec un seul canal et un débit de 20 kbps, la bande 915 MHz où 10 canaux avec un débit de 40 kbps sont disponibles et la bande ISM 2,45 GHz avec 16 canaux et un débit égal à 250 kbps. Les performances de l'IEEE 802.15.4 ne sont pas satisfaisantes pour les WBANs vu que le débit de données maximal pris en charge est de 250 Kbps, ce qui n'est pas suffisant pour certaines applications WBAN en temps réel ou pour un déploiement des WBANs de grande échelle.

### **1.7.4 IEEE 802.15.6**

En avril 2010, IEEE 802 créait un groupe de travail appelé IEEE 802.15.6 dont sa tâche essentielle est l'ébauche d'une norme de communication spécifique pour les

---

<sup>1</sup> [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)

WBANs. C'est une norme optimisée pour les nœuds capteurs à faible puissance fonctionnant sur ou autour du corps humain, utilisée pour diverses applications médicales et non médicales. La norme IEEE 802.15.6 [14] considérée comme la dernière normalisation des WBANs, vise à fournir une norme internationale pour une communication sans fil à faible puissance, à courte portée et extrêmement fiable dans la zone environnante du corps humain. La norme IEEE 802.15.6 prend en charge une large gamme de débits variant de 75,9 Kbps à 15,6 Mbps. De plus, la norme utilise plusieurs bandes de fréquences; la bande étroite (*narrowband*) qui utilise (400, 800, 900) MHz et (2,3 et 2,4) GHz, la bande ultralarge (UWB) qui varie entre (3,1~11,2) GHz, elle utilise aussi la communication avec le corps humain (Human body communication *HBC*) avec des fréquences dans la gamme de 5~50 MHz en offrant un débit de 2 Mbps.

## **1.8 Conclusion**

Les WBANs présentent une technologie émergente et très prometteuse. Ils connaissent un intérêt considérable ces dernières années en raison de leurs divers domaines d'application. Dans ce chapitre, nous avons étudié les WBANs après avoir introduit les WSNs. Bien qu'ils présentent des concepts généraux comme étant des réseaux de capteurs sans fil, les WBANs s'avèrent différents en ce qui concerne leurs caractéristiques et exigences. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la notion de routage dans les WBANs tout en étudiant les protocoles de routage existants développés spécialement pour ce type de réseau.

# 2

## Communication dans les Wireless Body Area Networks

### 2.1 Introduction

Un protocole de routage constitue la pierre angulaire du système de communication d'un réseau informatique. Il détermine les routes à suivre pour acheminer les données d'une source à une destination. Un WBAN est un cas particulier des WSNs, cependant les protocoles de routage développés pour les WSNs ne peuvent pas être utilisés directement sur les WBANs vu leurs caractéristiques et exigences. Dans la littérature, plusieurs protocoles de routage ont été développés spécialement pour les WBANs. Dans ce chapitre, nous commençons par une explication des challenges des protocoles de routages pour WBANs, puis nous présentons les différentes classes de ces protocoles tout en citant les caractéristiques des protocoles les plus connus de chaque classe. Nous accorderons plus d'attention aux protocoles à base de température en donnant des descriptions détaillées de chaque protocole de cette classe.

### 2.2 Routage dans WBAN

Dans un WBAN, la communication a lieu lorsque les nœuds capteurs transmettent leurs données à un nœud central, c'est-à-dire le sink, directement (un saut) ou via des nœuds intermédiaires (multi sauts), comme le montre la Figure 2. 1. La communication est initiée soit par une demande précédente du Sink, soit par un envoi périodique prédéfini des données mesurées ou par une alerte générée suite à toute défaillance ou

dépassement d'un seuil préfixé. Il est à signaler que dans le routage multi sauts, les sources peuvent agir comme des nœuds intermédiaires en fonction de leur position sur le corps humain.

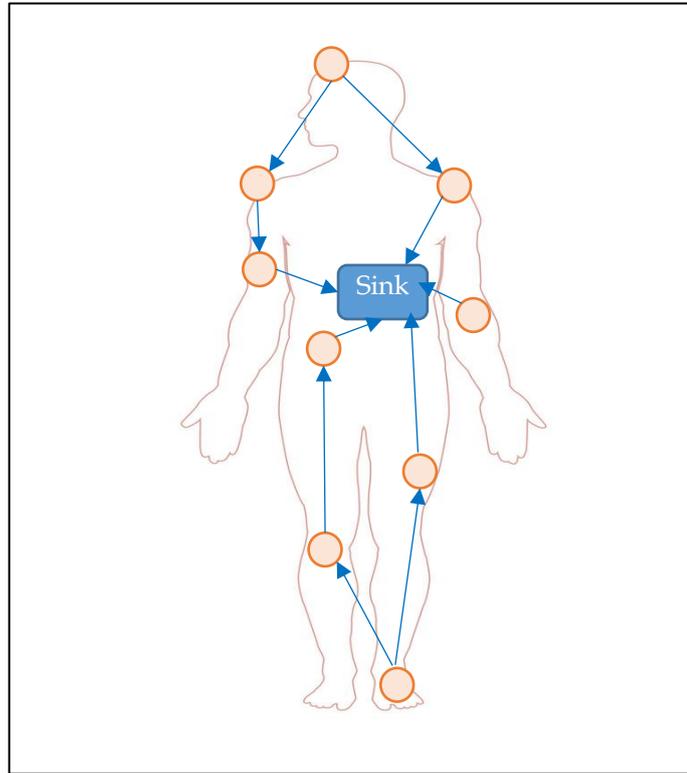


Figure 2. 1: Routage dans les WBANs

## 2.3 Challenges de routages dans les WBANs

La mise en œuvre et l'utilisation pratique de toute nouvelle technologie impose toujours de nouveaux défis. En effet, aujourd'hui, les WBANs doivent faire face à pas mal de défis et qui pourraient l'être dans les prochains jours également. Des solutions efficaces peuvent réduire ou résoudre certains problèmes mais, dans l'ensemble, certains problèmes seraient insolubles et seraient parfois spécifiques au contexte. Dans ce qui suit nous présentons quelques challenges qui doivent être relevés par les protocoles de routages des WBANs.

### 2.3.1 Posture corporelle

La posture du corps humain est l'un des défis les plus critiques [12, 39]. La plupart des capteurs développés pour les WBANs fonctionnent sur la base d'une communication par ligne de vue (line of sight *LoS*). Le *LoS* est fondamentalement un

type de propagation qui peut transmettre et recevoir des données uniquement lorsque les stations émettrice et réceptrice sont en vue l'une de l'autre sans aucune sorte d'obstacle entre elles. Une absence de LoS peut se produire lorsque les côtés avant et arrière d'un corps humain sont utilisés; cependant, pendant le sommeil, il ne peut y avoir qu'un seul côté pour une telle communication ou pas du tout de côté approprié en raison des différentes positions de l'utilisateur et de l'utilisation d'oreillers, d'une couverture, etc. ainsi, les transmissions de signaux pourraient vraiment être entravées. La Figure 2. 2 illustre les différentes positions; lorsqu'un être humain est en position assise, les capteurs peuvent ne pas être en mesure de communiquer correctement en raison de l'absence d'une ligne de vue. Un autre défi est le mouvement d'un être humain. Pendant les mouvements, les bras, les jambes et le milieu du corps peuvent former un angle qui empêche certains capteurs de communiquer avec d'autres capteurs ou d'autres appareils. Ces mouvements engendrent des changements fréquents dans la topologie des WBANs. Par conséquent, les algorithmes de routage proposés doivent s'adapter aux différentes modifications dans la topologie.

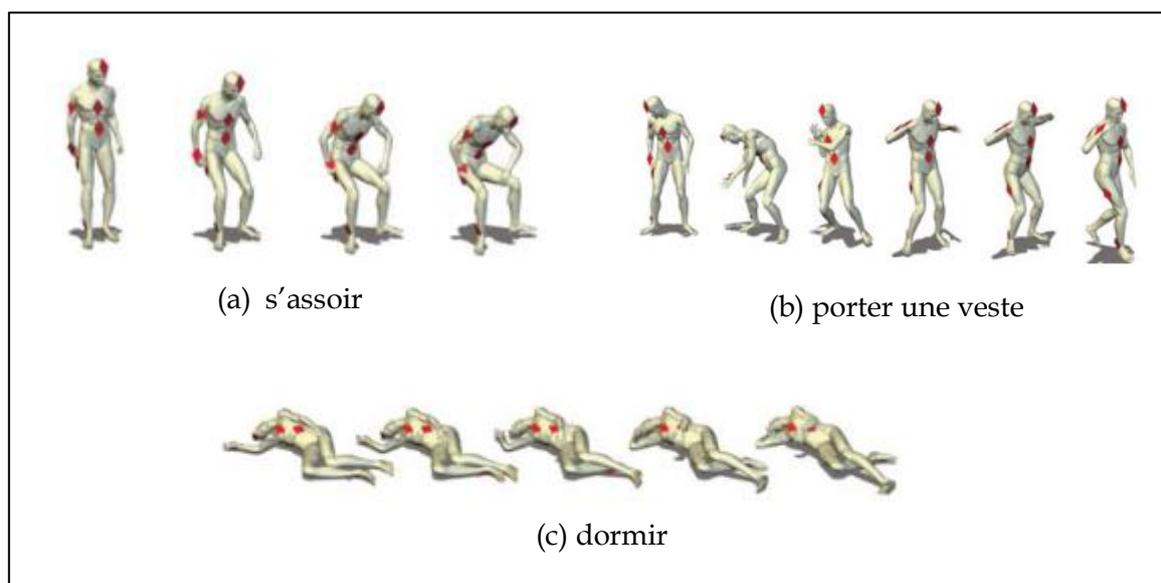


Figure 2. 2 : Postures du corps humain [41]

### 2.3.2 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie est un défi important pour les WBANs. Les capteurs biomédicaux sont généralement alimentés par des petites batteries. Ils ont besoin d'énergie pour toutes leurs activités (communication et détection) dont l'énergie requise

par les nœuds dans le WBAN varie selon le type d'application. Tous les nœuds implantés dans le corps humain doivent être en mesure de fonctionner pendant plusieurs années; par exemple les stimulateurs cardiaques doivent fonctionner pendant au moins 5 ans [42]. Des recherches supplémentaires doivent être menées pour rendre ces capteurs plus économes en énergie, ainsi diverses technologies de récupération d'énergie [43] doivent être utilisées pour améliorer la durée de vie de la batterie. La communication (transmission de données) est la source majeure de consommation d'énergie dans les WBANs (et les WSNs en général); pour cela, les protocoles de routage WBAN doivent être efficaces pour pouvoir minimiser la consommation d'énergie sans sacrifier la fiabilité. En outre, le protocole de routage doit disperser les données transmises entre les différents nœuds du réseau pour équilibrer la consommation d'énergie et minimiser les pannes causées par l'épuisement des batteries.

### **2.3.3 Surchauffe et absorption de rayonnement**

Pendant leurs activités, la température des nœuds capteurs augmente, cette augmentation est due au rayonnement de l'antenne et la consommation d'énergie par les circuits des nœuds. Cette température élevée peut affecter les organes thermosensibles du corps humain et peut endommager certains tissus [10, 11]. Pour réduire cette limite de température, la consommation d'énergie doit être limitée à un niveau minimum. La quantité de puissance absorbée par les tissus est exprimée par le débit d'absorption spécifique (Specific Absorption Rate *SAR*) [44]. Les expériences montrent que l'exposition à un *SAR* de 8 *W/kg* dans n'importe quel gramme de tissu de la tête ou du torse pendant 15 min peut avoir un risque important de lésion tissulaire [45]. Afin d'éviter cette surchauffe et de protéger les tissus humains, les développeurs doivent prendre en compte ce problème durant la conception des protocoles de routage pour les WBANs.

### **2.3.4 Durée de vie globale de réseau**

La durée de vie globale du réseau dans les WBANs peut être définie comme l'intervalle de temps entre la mise en œuvre du réseau et le moment où le réseau est considérablement endommagé conduisant à un partitionnement du réseau, tel que la destination ne peut pas être atteinte. Comme le remplacement et le rechargement de la

batterie ne sont pas possibles pour les capteurs biomédicaux notamment ceux implantés, la durée de vie du réseau est plus importante dans les WBANs que dans les WSNs. De ce fait, un protocole de routage fiable doit prolonger au maximum la durée de vie du réseau.

### **2.3.5 Limitation du nombre de sauts des paquets**

Selon le projet de la norme IEEE 802.15.6 pour les WBAN [30], la communication à un ou deux sauts est autorisée dans les WBANs. Tandis que la transmission multisauts fournit des liens plus solides conduisant à une augmentation globale de la fiabilité du système. Néanmoins, la consommation d'énergie augmente proportionnellement avec le nombre de sauts [46]; en d'autres termes plus le nombre de sauts est élevé, plus la consommation d'énergie est élevée. Cependant, la limitation du nombre de sauts des paquets n'a pas été prise en compte dans la plupart des protocoles de routage pour les WBANs.

### **2.3.6 Hétérogénéité de l'environnement**

Un WBAN met en œuvre différents types de biocapteurs pour mesurer et surveiller les différents paramètres du corps humain. Généralement, ces biocapteurs sont hétérogènes et peuvent également avoir des capacités différentes en matière de puissance de calcul, de capacités de stockage, de consommation énergétique et de débit de transmission (voir **Tableau 1.4** ). Pour cela, développer un protocole de routage prenant en compte toute cette hétérogénéité est une tâche très délicate.

### **2.3.7 La qualité de service et la fiabilité**

En raison de la nature hétérogène des nœuds biocapteurs dans les WBANs, les différentes données captées nécessitent une qualité de service (Quality of Service *QoS*) différente. Dans certains cas, les données doivent être envoyées lorsqu'elles sont détectées par des biocapteurs sans aucun retard, sinon elles seront inutiles. Donc il est essentiel que le WBAN ait la capacité de transmettre les données de manière cohérente et en temps réel; en particulier dans le cas d'un WBAN médical où les données (par exemple les données captées par l'EEG et l'ECG) doivent être envoyées immédiatement et sans aucune sorte de retard ou de perte. Cette exigence peut être assurée par un protocole de routage qui garantit la qualité de service (délais et fiabilité). Ces derniers

sont d'une importance primordiale surtout dans les applications médicales, car une information erronée ou arrivée en retard peut donner lieu à de graves conséquences et même être mortelle [47].

### **2.3.8 Sécurité et confidentialité**

La sécurité consiste à assurer une transmission de données biomédicales de la source à la destination d'une façon saine et sécurisée dans un environnement hostile [48]. La confidentialité fait référence aux données capturées qui ne peuvent être consultées ou utilisées que par une entité autorisée [49]. La sécurité et la confidentialité sont parmi les exigences de base des WBANs. Elles sont assurées en appliquant les techniques classiques de sécurisation (cryptage). Cependant, ces techniques classiques sont impraticables sur les WBANs vu leurs limitations en matière de ressources (puissance de calcul, capacité mémoire et énergie). À cet égard, le développement des protocoles de routage efficaces vise à vis les attaques de routage [2] (attaque externe ou mauvais comportement des capteurs) en assurant la sécurité et la confidentialité des données constitue un grand défi pour les développeurs.

### **2.3.9 Fiabilité et tolérance aux pannes**

La fiabilité peut être mesurée par la qualité de la liaison entre les nœuds ou par l'efficacité de la communication de bout en bout. Cependant, la tolérance aux pannes dans un WBAN signifie que le WBAN limite l'effet d'une panne, de sorte que le moins de composants réseau sont affectés [50]. La fiabilité et la tolérance aux pannes pour les WBANs sont des exigences de haut degré, car elles affectent directement la qualité de la surveillance médicale des patients. Des situations potentiellement mortelles non détectées peuvent entraîner la mort. Les biocapteurs sont des composants sensibles aux altérations d'états comme les phénomènes climatiques (humidité, chaleur, batterie faible, etc.), ils peuvent générer des erreurs. Un protocole de routage fiable doit détecter ce type d'erreur et d'y remédier afin de transmettre l'information et permettre au réseau de rester opérationnel.

## 2.4 Protocoles de routage pour les WBANs

Pour résoudre les challenges sus discutés, les chercheurs ont proposé divers protocoles de routage développés spécialement pour les WBANs. Ces protocoles sont classés dans 5 catégories principales [8, 9] : 1) à base de cluster (cluster-based), 2) cross-layer (cross-layered), 3) à base de posture (postured-based), 4) à base de qualité de service (QoS-aware), et 5) à base de température (temperature-aware). La Figure 2. 3 présente ces catégories en énumérant les protocoles les plus connus de chaque classe. La description de ces classes ainsi que les caractéristiques de ces protocoles de routage sont présentées dans ce qui suit.

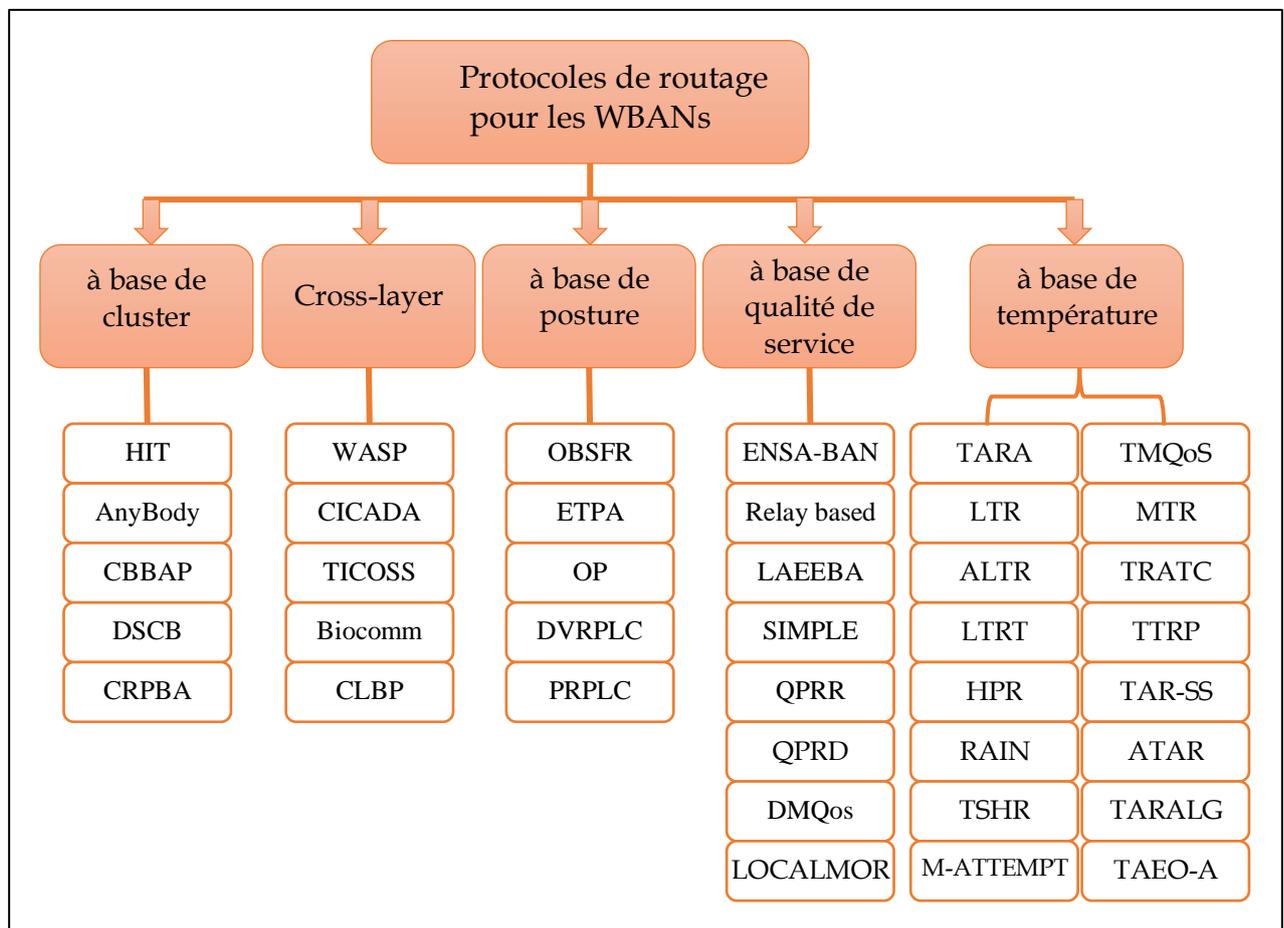


Figure 2. 3 : Taxonomie des protocoles de routage des WBANs

### 2.4.1 Les protocoles à base de cluster

La première classe des protocoles de routage pour les WBANs est celle des protocoles à base de cluster (cluster-based). Dans cette classe, les nœuds de WBAN sont divisés à des groupes (clusters) sans chevauchement et pour chaque groupe on désigne

un chef de groupe (cluster head *CH*) qui se change périodiquement. Pour transmettre des données au sink (la station de base), chaque nœud envoie ses données capturées à son chef de cluster, qui est à son tour les achemine vers le sink. Le but de cette classe des protocoles de routage est de minimiser la consommation d'énergie et maximiser la durée de vie du réseau en évitant les transmissions directes entre les nœuds et le sink. Cependant, les principaux inconvénients des protocoles de cette classe sont le temps et la surcharge causés par l'opération de formation des clusters et la sélection des CHs.

**Tableau 2. 1 : Protocoles à base de cluster**

Protocole	Démarche/But	Métriques de performance	Comparé avec	Nombre de sinks
HIT [51]	Améliorer la durée de vie de WBAN	Durée de vie du réseau, consommation moyenne d'énergie, délai moyen	LEACH [52] et PEGASIS [53]	Un
AnyBody [54]	Diviser le WBAN en cluster et transmettre les paquets vers le sink efficacement	Nombre de clusters, taille moyenne de cluster	LEACH	Un
CBBAP [55]	Améliorer la consommation d'énergie pour les WBANs	Débit, énergie résiduelle, nombre de nœuds vivants	LEACH	Un
DSCB [56]	Améliorer la stabilité du réseau et réduire les délais de transmission	Nombre des nœuds morts, énergie résiduelle,	DARE [57] et SIMPLE [58]	Deux
CRPBA [59]	Réduire la consommation d'énergie et augmenter le débit	Nombre de nœuds morts, énergie résiduelle,	Sans CRPBA	Deux

Dans la littérature, certains protocoles de cette classe ont été proposés: HIT [51], AnyBody [54], DSCB [56] et CRPBA [59]. La différence principale entre ces protocoles réside dans la méthode d'élection de CH. HIT [51] et AnyBody [54] utilisent une méthode basée sur la densité des nœuds, c'est-à-dire le nœud ayant la plus haute densité de ses voisins sera élu CH. DSCB [56] utilise une fonction multifacteurs à base d'énergie résiduelle, force d'émission et la distance vers le sink. Dans CBBAP [55], les CHs sont choisis par les nœuds voisins. Dans CRPBA [59], le nœud le plus proche au sink avec une énergie maximum sera élu comme CH. Le Tableau 2. 1 résume les caractéristiques de chacun de ces protocoles.

Vu le nombre réduit des nœuds dans les WBANs de petites tailles et le changement fréquent dans la topologie du réseau à cause des mouvements de corps humain, le routage à base de cluster n'est pas si efficace pour les WBANs de petite taille.

## 2.4.2 Les protocoles Cross-layer

Les protocoles de ce cette classe utilisent le concept de couches croisées, qui permet aux différentes couches de la pile protocolaire de partager des informations d'état ou de coordonner leurs actions; c'est un concept déjà traité dans les WSNs [60]. Dans ce modèle et contrairement au modèle traditionnel, les couches de la pile protocolaire partagent leurs informations et paramètres. Ce modèle propose différentes alternatives par rapport au modèle en couches classique. Par exemple la création de nouvelles interfaces pour gérer la connexion et le flux d'informations entre les couches et la fusion de couches adjacentes où une nouvelle couche (super couche) est créée en fusionnant les services fournis par deux couches ou plus (Figure 2. 4) [61]. Ce modèle peut être utile pour le routage dans les WBANs où la couche réseau et la couche MAC peuvent partager des informations et par conséquent on améliore les performances globales du réseau [62].

**Tableau 2. 2 :** Protocoles Cross-layer pour WBANs

<b>Protocole</b>	<b>Démarche/But</b>	<b>Métriques de performance</b>	<b>Comparé avec</b>
WASP [46] 2006	Réduire la consommation d'énergie, réduire les délais et le taux de paquets perdus	Les délais de bout en bout	CSMA avec routage fixe
CICADA [63] 2007	Réduire la consommation d'énergie, réduire les délais	Les délais de bout en bout	-
TICOSS [64] 2007	Améliorer 802.15.4 en divisant le WBAN en fuseaux horaires	Durée de vie de réseau	802.15.4 sans TICOSS
Biocomm [65] 2009	Optimiser la performance globale du WBAN	Température maximale, consommation moyenne d'énergie, délai de livraison des paquets, pourcentage de paquets abandonnés, débits cumulés	SHR (shortest hop routing), HPR[11]
CLBP [41] 2017	Supporter la mobilité, topologie multi sauts	Perte de chemin, probabilité de coupure (taux d'erreur sur les paquets)	-

Le Tableau 2. 2 résume les différents protocoles de routage Cross-layer sur la base des objectifs visés et les métriques utilisées dans l'évaluation de ces protocoles en comparaison avec les autres.

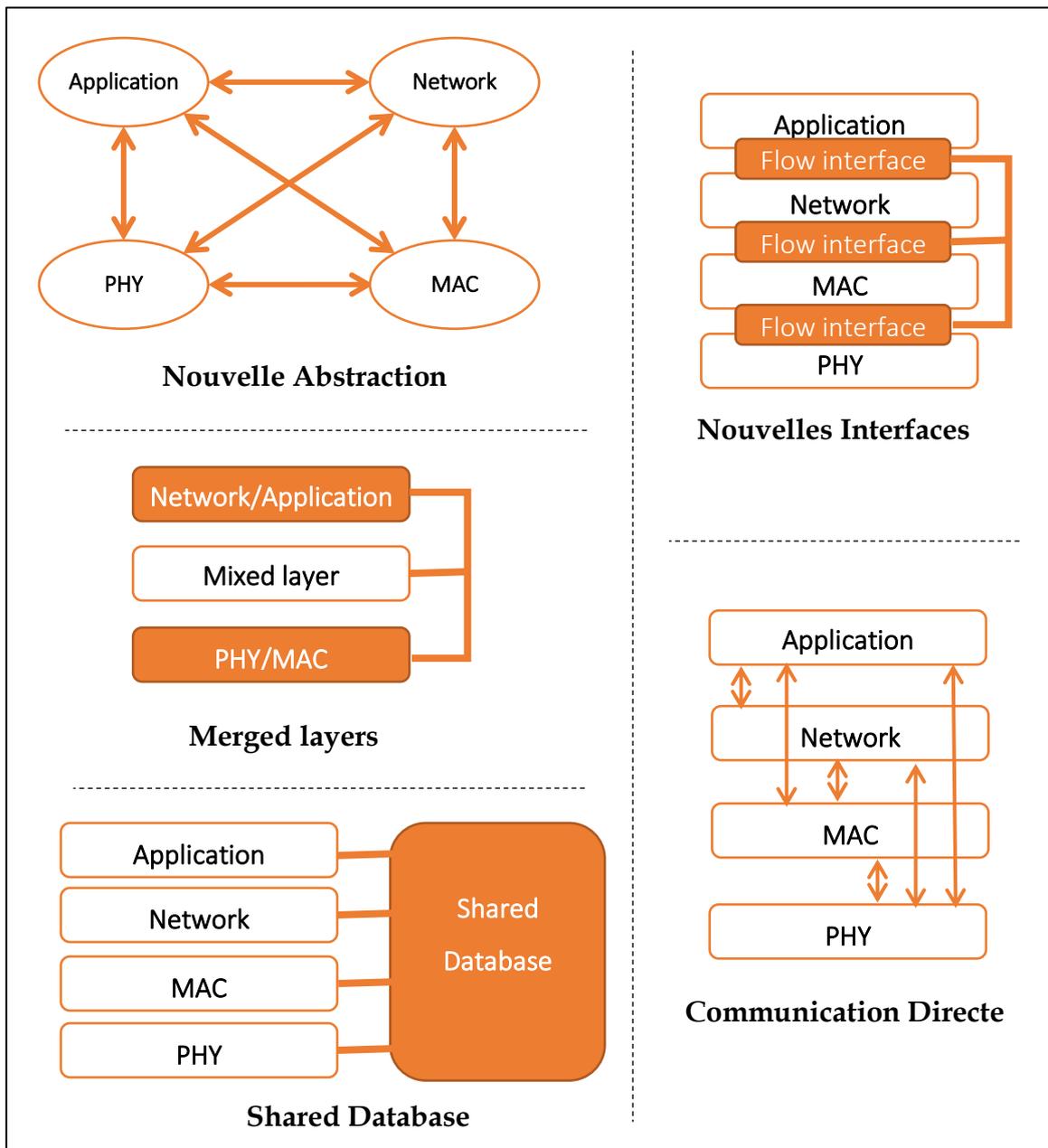


Figure 2. 4 : Techniques utilisées par la méthode de couches croisées

La comparaison des performances des protocoles précédents montre que le protocole Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment (CICADA) [63] ainsi que Time zone COordinated Sleep Scheduling TICOSS [64] sont les plus efficaces en ce qui concerne la consommation d'énergie. Le

protocole Wireless Autonomous Spanning tree Protocol (WASP) [46] est le plus performant en terme du taux de livraison de paquets. Enfin, concernant les délais de livraison, CICADA est le meilleur [62]. Le protocole Cross Layered Broadcast Protocol CLBP [41] est le seul protocole qui supporte la mobilité.

### **2.4.3 Les protocoles à base de posture**

Les protocoles de cette classe sont proposés pour remédier aux coupures et déconnexions des liens entre deux nœuds (ou plus) qui génèrent un découpage de réseau. Ces coupures sont causées par les mouvements posturaux du corps humain (mouvement des membres par exemple), elles génèrent des changements fréquents dans la topologie des WBANs. Le but de ces protocoles est de réduire les délais de transmission en établissant rapidement des liens stables. L'étude de diverses postures du corps humain est d'une grande importance. Des études montrent que toutes sortes de mouvements du corps suivent une certaine régularité [66]. Pour résoudre le problème de déconnexion des liaisons, les protocoles utilisent une fonction de cout mise à jour périodiquement en se basant sur l'état des liens. Le meilleur chemin à suivre pour acheminer les paquets vers le sink est celui qui a la valeur minimale de la fonction de cout.

Les protocoles de cette classe les plus connus sont : On-Body Store and Flood Routing (OBSFR) [67], Probabilistic routing with postural link costs (PRPLC) [68], Distance Vector Routing with Postural Link Costs (DVRPLC) [69], Opportunistic Routing (OP)[70], et Energy efficient Thermal and Power Aware routing (ETPA) [71]. Les caractéristiques de ces protocoles sont synthétisées dans le Tableau 2. 3.

L'avantage majeur de ces protocoles est leur support de mobilité. Cependant, ces protocoles nécessitent un grand nombre de transmissions pour mettre à jour les informations concernant les états des liaisons ce qui consomme davantage l'énergie. La comparaison des performances de ces protocoles montre que le protocole OBSFR [67] a de meilleures performances concernant les délais de livraison des paquets. Cependant, le protocole OP [70] est le meilleur sur le plan consommation d'énergie [62].

**Tableau 2. 3 :** Protocoles à base de posture pour WBANs

Protocole/année	Démarche/But	Métriques de performance	Comparé avec
OBSFR [67] 2009	Réduire les délais de bout en bout et le nombre de sauts	Qualité des liens	PROPHET [72]
PRPLC [68] 2009	Réduire des délais de bout en bout	Délais moyens et taux de livraison des paquets	OBSFR [67] et PROPHET [72]
DVRPLC [69] 2010	Réduire des délais de bout en bout	Délais moyens et taux de livraison des paquets	PROPHET [72] et UTILITY[73]
OP [70] 2011	Augmenter la durée de vie de réseau	Consommation moyenne d'énergie par bit	Un saut et multi sauts
ETPA [71] 2012	Réduire la température des nœuds	Nombre de sauts, taux de livraison, latence, température moyenne des nœuds, l'évolutivité, le temps de déplétion du premier nœud mobile	PRPLC [68]

#### 2.4.4 Les protocoles à base de qualité de services

Les protocoles de cette classe sont proposés pour satisfaire les besoins en termes de qualité de service (QoS). Plusieurs exigences de QoS doivent être prises en compte dans les WBANs [9] à savoir la priorité des données, l'efficacité énergétique, la fiabilité de liaison et de transmission des données, le faible délai de transmission, la température du nœud, la sécurité des données, etc. Un protocole de routage avec qualité de service est celui qui contient des modules supplémentaires où chaque module correspond à une métrique de qualité de service. On trouve généralement trois modules [39]; 1) module assurant l'efficacité énergétique, 2) module assurant la fiabilité et 3) le module sensible au retard. Par conséquent, ces approches offrent une fiabilité plus élevée, un délai de bout en bout plus faible avec un taux de livraison de paquets plus élevé, tout cela en consommant moins d'énergie. Le développement de ces protocoles est une tâche très délicate, car on doit assurer la coordination entre ces modules ce qui augmente leur complexité.

Dans la littérature, des dizaines de protocoles à base de QoS ont été proposés, les plus connus d'entre eux sont : LOCALized Multi-Objective Routing protocol (LOCALMOR) [47], Data-centric Multi objective QoS-aware routing protocol (DMQoS) [74], QoS-aware Peering Routing protocol for Delay sensitive data (QPRD) [75], Stable Increased-throughput Multi-hop Protocol for Link Efficiency (SIMPLE) [58], QoS aware Peering Routing protocol for Reliability sensitive data (QPRR) [76], Link-Aware and

Energy Efficient scheme for Body Area networks (LAEBA) [77], Relay based routing protocol [78] et Efficient Next hop Selection Algorithm (ENSA-BAN) [79] (d'autres QoS protocoles avec plus de détails peuvent être trouvés dans [80]). Le Tableau 2. 4 résume les caractéristiques de ces protocoles.

**Tableau 2. 4 : Protocoles à base de QoS**

Protocole/année/ Nb de sinks	Démarche/But	Métriques de performance	Comparé avec
LOCALMOR [47] 2009 Multi-sinks	Tenir compte de la diversité du trafic typique des applications biomédicales et fournir un routage efficace pour différentes métriques de qualité de service (QoS)	Taux de réception des paquets, les délais de bout en bout, taux de réception des paquets dans les délais	SPEED[81], MMSPEED [82], GFW (Greedy Forwarding Protocol), EAGFS [83]
DMQos [74] 2011 Multi-sinks	Obtenir une meilleure qualité de service pour les différents types de données	Les délais de bout en bout, taux de paquets délivrés, consommation moyenne d'énergie par paquet	MMSPEED [82] LOCALMOR[47] DARA [84]
(QPRD) [75] 2012 Multi-sinks	Pour réduire les délais de bout en bout	Charge réseau, taux de transmissions réussies, nombre de paquets expirés	DMQos[74]
QPRR [42] 2013 Multi-sinks	Améliorer la fiabilité de livraison des données d'urgences pour un WBAN médical	Taux des transmissions réussies, trafic réseau, consommation d'énergie, latence	DMQos[74] NoRouting (fiabilité non considérée)
SIMPLE [58] 2013 Mono-sink	Augmenter la période de stabilité du réseau et le taux de paquets livrés	Durée de vie du réseau, période de stabilité, débit, énergie résiduelle, taux de perte de chemin	M- ATTEMPT[85]
LAEBA [41] 2014 Mono-sink	Acheminer des données avec un taux de perte de chemin minimale	Période de stabilité, énergie résiduelle, durée de vie du réseau, taux de perte de chemin, débit	SIMPLE [58], M- ATTEMPT[85]
Relay based routing protocol [78] 2015 Mono-sink	Maximiser la durée de vie de réseau et minimiser les délais de livraison	L'énergie résiduelle, nombre de nœuds épuisés, nombre de paquets abandonnés, taux de paquets livrés.	Single-hop Multi-hop CH-Rotate
ENSA-BAN [79] 2016 Mono-sink	Améliorer les performances globales de QoS du réseau en utilisant la fonction de cout de liaison	Consommation d'énergie, paquets transmis, délais de bout en bout, taux de livraison des paquets	DMQoS [74]

En résumé, chacun de ces protocoles de routage vise uniquement à satisfaire une exigence spécifique concernant la qualité de service dans les WBANs. Le choix d'un protocole par rapport à d'autres dépend de type de données collectées et des exigences

demandées par l'application WBAN. Le protocole QoS-aware Peering Routing protocol for Delay sensitive data (QPRD) et le protocole QoS aware Peering Routing protocol for Reliability sensitive data (QPRR) sont les plus efficaces en termes de consommation d'énergie [62]. Cependant, le protocole Data-centric Multi objective QoS-aware routing protocol (DMQoS) est l'un des protocoles les plus utilisés de cette classe notamment pour les applications qui exigent des faibles latences [62].

#### **2.4.5 Les protocoles à base de température**

Les WBANs sont des réseaux sans fil composés d'un certain nombre de biocapteurs qui peuvent être implantés dans le corps humain. Ils échangent des données entre eux à l'aide des ondes radio. Cette activité radio génère des champs électriques et magnétiques ce qui entraînera une augmentation de la température en raison de l'absorption du rayonnement de l'antenne. Ainsi la consommation électrique des circuits des nœuds lors de leurs activités (faire les traitements des données captées) génère aussi la chaleur (par l'effet de joule), tout cela contribue à l'augmentation de la température [10]. Cette augmentation de température peut influencer négativement le corps humain. Ainsi, le flux sanguin sera réduit et les organes sensibles peuvent subir de graves dommages thermiques. Plus précisément, une élévation prolongée de la température dans les tissus corporels peut entraîner des lésions tissulaires, une réduction du flux sanguin dans certains organes et provoquer des réactions enzymatiques [11].

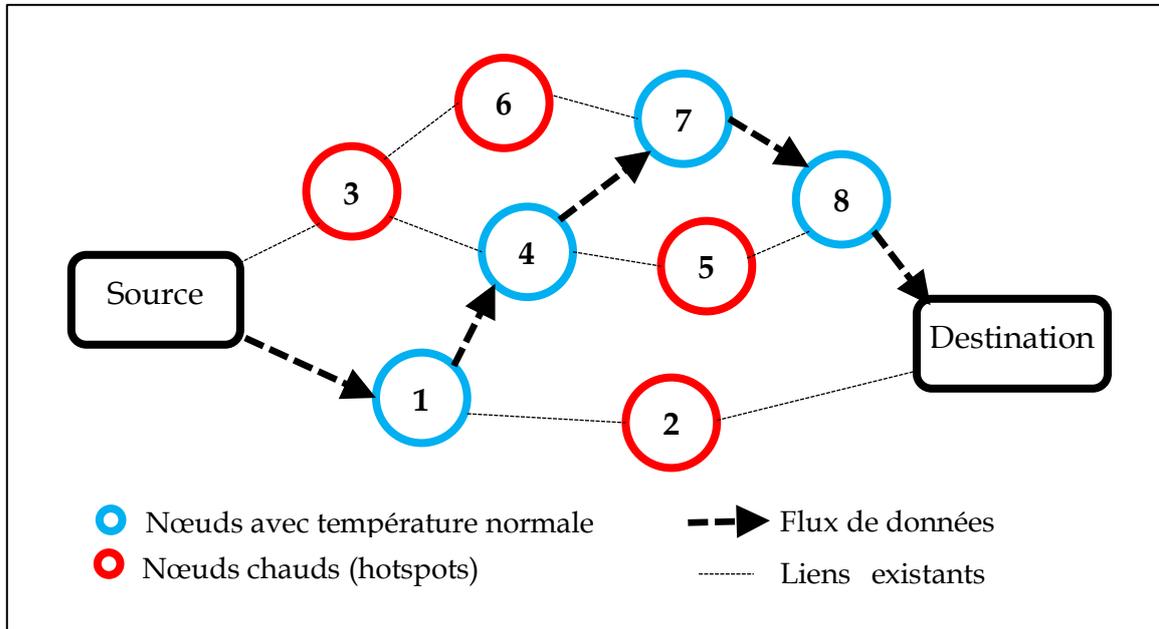
La quantité d'énergie de rayonnement absorbée par le tissu humain par unité de poids est référencée comme Débit d'Absorption Spécifique (Specific Absorption Rate (SAR))[10, 86], elle est mesurée par l'équation (1) suivante :

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} (W / Kg) \quad (1)$$

Où  $\sigma$  est la conductivité électrique du tissu,  $E$  est le champ électrique induit par le rayonnement et  $\rho$  est la densité du tissu.

Au cours de ces dernières années, plusieurs chercheurs ont tenté de résoudre le problème de l'augmentation de la température et de la surchauffe. L'objectif de tous les protocoles de routage à base de température (appelés aussi thermiques) pour les

WBANs est de réduire l'augmentation de température des nœuds capteurs biomédicaux implantés, ou de réduire rapidement la température des nœuds chauds (hotspots) en évitant ces nœuds hotspots lors de la sélection des chemins de routage (Figure 2. 5).



**Figure 2. 5 :** Schéma de routage adopté par les protocoles à base de température

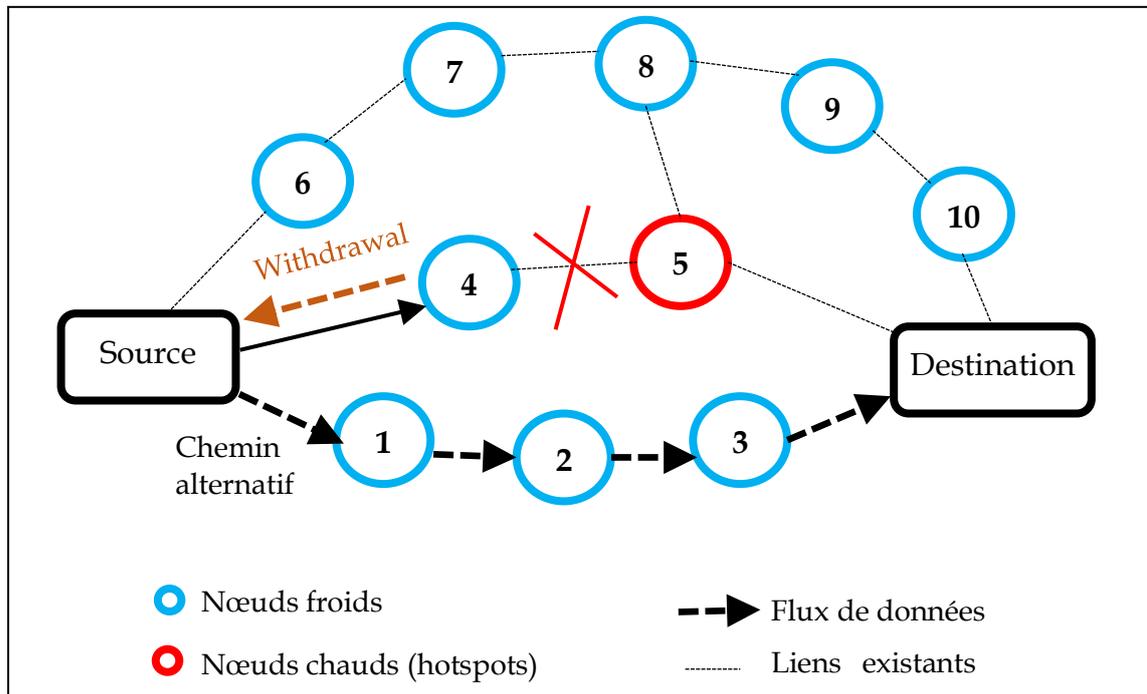
Dans ce qui suit, nous discutons des protocoles de routage à base de température les plus connus proposés au cours de ces dernières années.

#### 2.4.5.1 Thermal-Aware Routing Algorithm

Le protocole Thermal-Aware Routing Algorithm (TARA) proposé en 2005 dans [10] est la première réalisation proposée dans ce domaine. Le protocole définit les nœuds avec une température élevée (supérieur à une valeur préfixée) comme *hotspots*. L'objectif de ce protocole est de réduire la surchauffe des nœuds en évitant d'acheminer les paquets à travers ces hotspots (Figure 2. 6). En d'autres termes, TARA prend la température des nœuds comme paramètre de sélection des chemins de routage. Il choisit le prochain saut qui a une température inférieure à la valeur du seuil (*threshold*).

TARA suppose qu'il n'y a pas de capteur de température à l'intérieur des nœuds pour mesurer la température. Par conséquent, un nœud mesure la température des

capteurs voisins en observant leurs activités, en ce qui concerne le rayonnement de l'antenne et la dissipation d'énergie.



**Figure 2. 6 :** Exemple de fonctionnement de TARA

Le protocole TARA est composé de deux phases. La première est la phase d'initialisation, dans laquelle les nœuds échangent les informations concernant leur voisinage en ce qui concerne le nombre de sauts vers le sink; ces informations sont utilisées pour construire les tables de routage. Donc à la fin de cette phase, chaque nœud sait comment il peut atteindre le sink. Dans la deuxième phase appelée phase de routage, quand un nœud reçoit un paquet de données destiné à un voisin marqué comme hotspot. Il met le paquet en cache en attendant que la température descende en dessous de la valeur seuil, le paquet sera rejeté après l'écoulement d'un certain temps. Cependant, si tous les nœuds voisins sont des hotspots et aucun d'entre eux n'est la destination, la stratégie de retrait (*withdrawal*) est utilisée. La stratégie de *withdrawal* consiste à renvoyer (retourner) les paquets de données au nœud émetteur pour trouver des itinéraires alternatifs. Le principe de cette stratégie est illustré dans la Figure 2. 6. La stratégie de *withdrawal* a permis d'augmenter le taux de livraison des paquets par rapport au routage de saut le plus court (Shortest Hop Routing *SHR*). Après le

refroidissement des nœuds hotspot, ils peuvent être de nouveau sollicités pour le routage.

Le protocole TARA est simple, sa stratégie de withdrawal a un impact significatif sur la prévention de routage à travers les nœuds hotspots. Cependant, elle augmente le nombre de retransmissions, car le nœud sera de retour pour rechercher des alternatives après avoir déjà vérifié tous les nœuds hotspots. Comme résultat, la durée de vie de réseau est négativement influencée à cause des délais d'acheminement élevés.

#### **2.4.5.2 Least Temperature Routing**

Le protocole Least Temperature Routing (LTR) proposé en 2006 dans [87] est développé sur la base de protocole TARA. LTR est très similaire à TARA notamment dans la phase d'initialisation où les nœuds échangent les informations concernant leur voisinage en ce qui concerne le nombre de sauts vers le sink ; ces informations sont utilisées pour construire les tables de routage. Ainsi comme TARA, les nœuds observent les activités de leur voisinage pour estimer les températures des nœuds voisins. Cependant, l'amélioration apportée par LTR réside dans la phase de routage. Avec TARA, quand un paquet de données arrive au nœud voisin de la destination et cette destination est hotspot, le paquet sera mis en cache. Dans LTR le paquet est envoyé à la destination immédiatement bien qu'elle soit hotspot. De plus LTR sélectionne le nœud qui a la température la plus basse comme prochain saut jusqu'à ce que la destination soit atteinte, cela ne garantit pas que les paquets soient transférés à destination de sink en suivant le meilleur chemin possible.

Par conséquent, le paquet compte le nombre de sauts passés. Si ce nombre dépasse la valeur prédéterminée notée MAX\_HOPS qui dépend de la taille de réseau, le paquet actuel sera rejeté et réacheminé en utilisant une route alternative. Le but de ce mécanisme est d'empêcher un paquet d'aller trop loin dans le réseau. LTR garantit la non-redondance des routes en conservant dans le paquet les traces de tous les nœuds déjà visités dans une certaine fenêtre de temps. Donc chaque nœud essaye de transmettre le paquet au nœud voisin le plus froid non déjà visité. La Figure 2. 7 illustre le principe de fonctionnement de LTR.

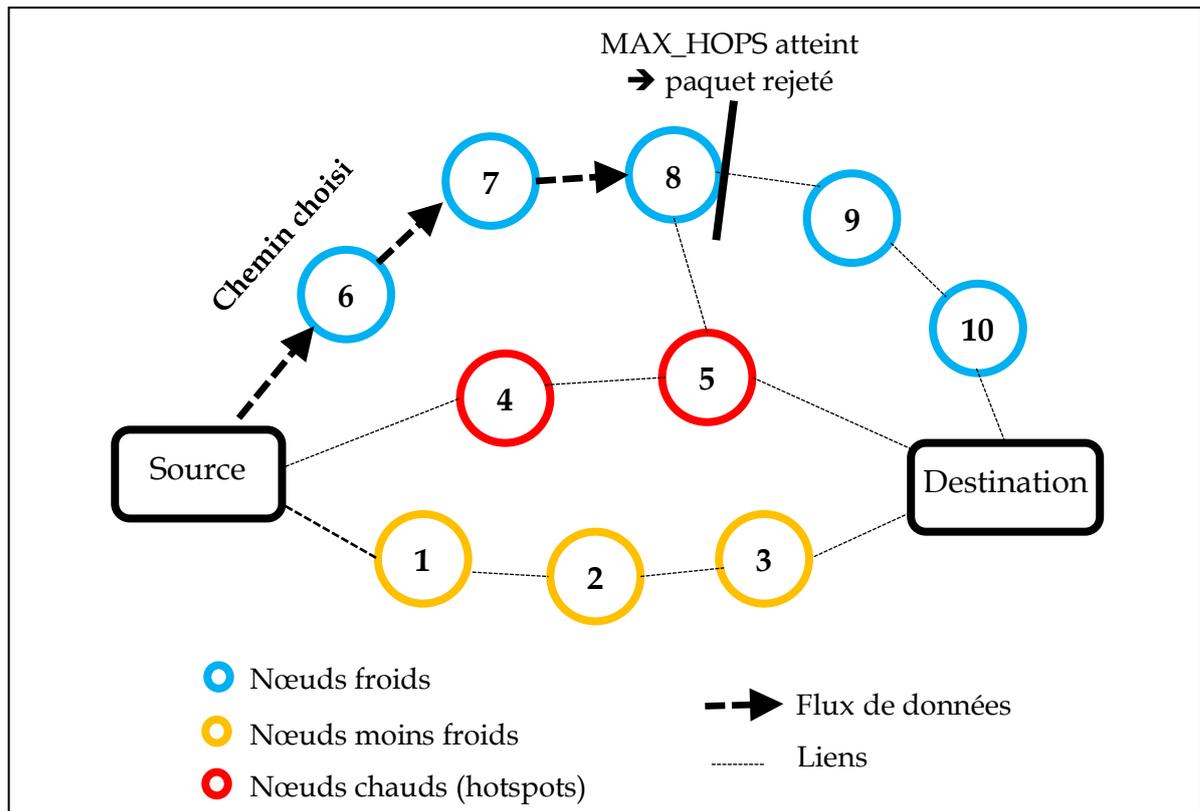


Figure 2. 7 : Exemple de fonctionnement de LTR

Le protocole LTR montre une amélioration significative concernant le taux de retransmission. Cependant, il augmente les délais de bout en bout, car le paquet de données ne suit pas le meilleur chemin possible et la plupart des nœuds sont impliqués dans le routage. Cela peut également augmenter la température globale du réseau.

### 2.4.5.3 Adaptive Least Temperature Routing

Le protocole Adaptive Least Temperature Routing (ALTR) proposé en 2006 dans [87] est une version avancée de LTR. Il est semblable au protocole LTR sauf qu'il ajoute un nouveau paramètre appelé : MAX\_HOPS\_ADAPTIVE. À la réception d'un paquet de données par un nœud, il compare son nombre de sauts avec MAX\_HOPS\_ADAPTIVE. S'il est plus petit que MAX\_HOPS\_ADAPTIVE, il sera routé en suivant la même méthode utilisée par LTR. Si le nombre de sauts du paquet est supérieur à MAX\_HOPS\_ADAPTIVE, et contrairement à LTR qui rejette le paquet dans ce cas, le paquet sera routé en utilisant l'algorithme de saut minimum (SHR) en ignorant la température des nœuds. En d'autres termes, dans ce cas les paquets peuvent

être routés à travers des nœuds hotspots. La Figure 2. 8 illustre le principe de fonctionnement de protocole ALTR.

La deuxième amélioration de ALTR réside dans son nouveau mécanisme appelé «délai proactif», dont son but est de réduire l'augmentation de température au détriment de délais de livraison des paquets. Ainsi si un nœud reçoit un paquet et qu'il n'a plus que de deux voisins, de sorte que la température de son voisin le plus frais est relativement élevée; le nœud retarde le paquet d'une unité de temps avant de le transmettre à ce voisin. Cette stratégie de retardement est utile dans les topologies faiblement connectées (par exemple l'anneau) ; elle permet de réduire la température moyenne du réseau. Cependant, elle peut aussi augmenter les délais moyens d'acheminement des paquets.

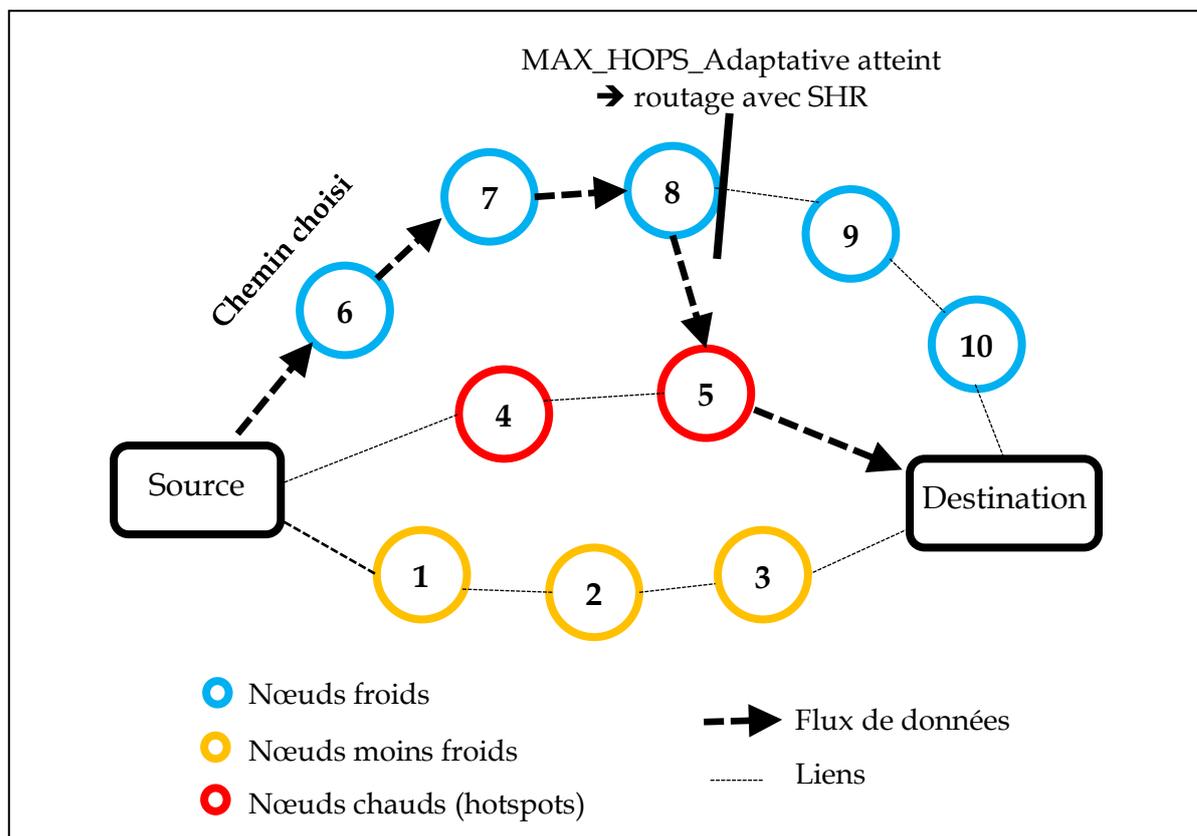


Figure 2. 8. Exemple de fonctionnement de ALTR

#### 2.4.5.4 Least Total Route Temperature

Le protocole Least Total-Route Temperature (LTRT) proposé en 2008 dans [88] est une combinaison du protocole LTR et SHR. Contrairement aux trois protocoles discutés

précédemment (TARA, LTR et ALTR) qui ne prennent en compte que la température du prochain saut, et par conséquent, ils augmentent le nombre de sauts et la température totale de l'ensemble du réseau. Le protocole LTRT est proposé pour prendre en compte la température totale de la route. Ainsi les paquets sont routés en utilisant la route ayant la température la plus basse. La température d'une route est la somme des températures des nœuds formant cette route. Pour trouver la route avec une température minimum, LTRT convertit le réseau en un graphique pondéré avec la température comme poids. Ensuite, il applique l'algorithme de Dijkstra pour calculer le plus court chemin correspondant à la route avec une température minimale. La construction du graphe est faite comme suit : tout d'abord, chaque nœud recueille les informations de température de ses nœuds voisins, ensuite il construit toutes les routes possibles vers la destination, enfin, il attribue la température en tant que poids à chaque nœud intermédiaire et construit le graphe pondéré. Cette opération se répète périodiquement pour éviter l'augmentation de la température de chemin (la température de plus court chemin augmente rapidement en continuant à l'utiliser). La Figure 2. 9 illustre le fonctionnement de protocole LTRT.

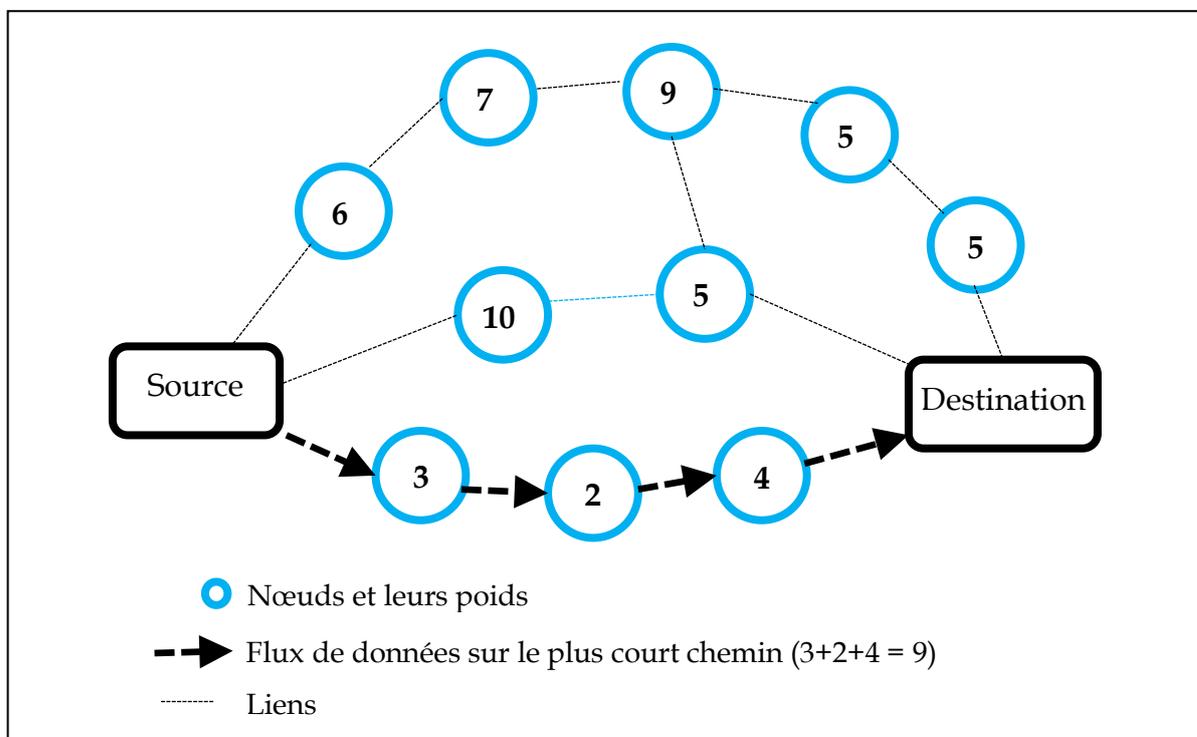


Figure 2. 9. Exemple de fonctionnement de LTRT

Le protocole LTRT réduit d'une manière significative l'augmentation moyenne de la température par rapport aux LTR et ALTR. Il réduit également le nombre de sauts et le taux de perte de paquets par rapport aux LTR, ALTR et SHR. Cependant, le calcul de tous les chemins et la mise à jour périodique des informations peuvent affecter la durée de vie de réseau et les délais d'acheminement des informations critiques (applications médicales par exemple). En outre, comme TARA, LTR et ALTR, LTRT ne prend en compte que la température des nœuds comme métrique de routage.

#### **2.4.5.5 Hotspot Preventing Routing**

Le protocole Hotspot Preventing Routing (HPR) proposé en 2008 dans [11] est une amélioration des deux protocoles LTR et ALTR. Ces deux protocoles essaient de réduire l'augmentation dans la température globale du réseau ce qui n'évite pas forcément la création des nœuds hotspots. HPR est développé pour satisfaire les besoins des applications sensibles au retard (Applications médicales par exemple). Il réduit les délais d'acheminement des paquets en évitant que les paquets prennent des chemins non optimaux. Pour cela, HPR choisit les itinéraires qui constituent le minimum de sauts depuis les nœuds sources aux nœuds destination en appliquant l'algorithme SHR. Il empêche également la génération des hotspots par l'utilisation d'une valeur seuil pour contrôler la température des nœuds.

Le protocole HPR est composé de deux phases. Dans la phase d'initialisation, les nœuds échangent les informations concernant leurs températures initiales et les plus courts chemins vers le sink. Ces informations sont utilisées pour construire les tables de routage. Dans la phase de routage, les paquets sont routés en utilisant l'algorithme SHR. Si un nœud hotspot est détecté sur le chemin, et qui est la destination du paquet, le paquet lui sera délivré immédiatement. Autrement, le paquet sera envoyé au nœud non déjà visité ayant la plus basse température. Il est à noter qu'un hotspot dans HPR est un nœud dont sa température est plus grande que : la moyenne de la température de l'émetteur et la température moyenne de ces voisins, additionnée à la valeur de seuil (threshold). Similaire au protocole LTR et HPR, il utilise le paramètre seuil MAX\_HOPS pour rejeter les paquets qui dépassent cette valeur, et une liste de nœuds récemment visités pour empêcher toute boucle de routage. Ainsi, si le voisin ayant la plus basse

température est déjà dans la liste des nœuds récemment visités pour le paquet courant, le paquet sera transmis au voisin ayant la deuxième température la plus basse parmi tous les nœuds voisins et ainsi de suite.

La différence essentielle de HPR par rapport à ces prédécesseurs réside dans sa méthode dynamique utilisée pour marquer les nœuds hotspots. Contrairement aux autres protocoles qui utilisent une valeur fixe de la variable threshold, HPR calcule cette valeur à la base de la température de nœud émetteur et les températures de ses voisins. Cependant, le routage à base de SHR n'est pas idéal pour la durée de vie du réseau [89], en plus le cout de calcul de la valeur du seuil ainsi que le mécanisme de rejet de paquets influent négativement sur la durée de vie du réseau.

#### **2.4.5.6 Routing Algorithm for network of homogeneous and Id-less bio medical sensor Nodes**

La principale différence entre Le protocole Routing Algorithm for network of homogeneous and Id-less bio medical sensor Nodes (RAIN) [90], proposé en 2008, et les protocoles précédents est la non utilisation des identifiants prédéfinis des nœuds (ID-less). Cela ne signifie pas que les nœuds sont sans identifiant, mais au lieu d'utiliser des IDs statiques, RAIN utilise des IDs temporaires générés pendant la phase d'initialisation. Ainsi, chaque nœud génère un nombre aléatoire compris entre 1 et  $2^{16}-1$  qui sera son ID pendant la durée de vie opérationnelle. Le 'zéro' ID est réservé pour le sink. RAIN utilise un adressage local où chaque nœud a besoin uniquement de connaître les IDs de ses voisins. Cela signifie qu'il peut y avoir deux nœuds avec des IDs identiques dans deux localités différentes du réseau sans affecter la performance du réseau. Tous les nœuds, y compris le sink, diffusent leurs identifiants par des paquets *Hello*. Le but de cette approche est de réduire le surcout très élevé de la maintenance des IDs. En fait, dans les réseaux de capteurs, obtenir les données détectées par un nœud à travers le réseau est plus important que connaître l'ID du nœud lui-même [91].

Pour le routage, RAIN utilise la technique à sauts multiples; chaque paquet a un identifiant unique de la forme  $[N, T, R]$  où  $N$  est l'ID du nœud,  $T$  est le temps de génération du paquet par le nœud source et  $R$  est un nombre aléatoire. Chaque nœud enregistre une liste des identifiants des paquets qu'il a déjà traités, et ceci pour éviter la

transmission de paquets en double. En fait, le nœud supprime le paquet si son ID existe déjà dans cette liste. La vérification du nombre de sauts est également implémentée, chaque paquet dont son nombre de sauts dépasse le seuil "HOP\_THRESH" sera rejeté pour empêcher les paquets de circuler inutilement dans le réseau.

RAIN prend en considération la température des nœuds, il sélectionne le prochain saut en se basant sur des probabilités inversement proportionnelles à la température estimée des nœuds. De cette façon, le nœud voisin "le plus froid" sera probablement choisi comme nœud du saut suivant. Si le nœud destination est parmi les nœuds voisins, le paquet lui sera délivré directement. À la réception d'un paquet par le sink, il diffuse un message de mise à jour contenant l'identifiant du paquet à tous ses nœuds voisins, et ce pour arrêter d'envoyer plusieurs copies du même paquet.

Bien que RAIN utilise une approche d'identification des nœuds qui vise à réduire le surcoût de la maintenance des IDs globaux, il engendre une surcharge réseau qui augmente les délais d'acheminement des paquets.

#### 2.4.5.7 Thermal Aware Shortest Hop Routing

Thermal Aware Shortest Hop routing (TSHR) proposé en 2009 dans [92] est une amélioration de HPR. Il a été conçu pour les applications critiques exigeant une haute priorité. En fait les paquets rejetés pour une raison quelconque sont instantanément retransmis. TSHR est très similaire à HPR, la première différence est que dans TSHR, il existe deux types de seuils pour contrôler la température des nœuds :  $T_s$  et  $T_{dn}$ .  $T_s$  est un seuil statique fixe qui définit la température maximale autorisée dans le réseau c.-à-d. les températures que les nœuds ne doivent pas excéder.  $T_{dn}$  est un seuil dynamique défini pour chaque nœud en fonction de sa température et de la température des nœuds voisins. Un nœud est déclaré comme un hotspot si sa température est supérieure au  $T_{dn}$  qui est calculé comme suit :

$$T_{dn} = temp_n + 0.25 \sqrt{temp_n} + 0.25 \sqrt{avg_n} \quad (2)$$

Où,  $temp_n$  est la température du nœud et  $avg_n$  est la température moyenne de ses voisins.

La deuxième différence est qu'aucun paquet n'est abandonné dans TSHR. Si le nombre de sauts dépasse le seuil de saut maximum, le paquet est transmis à l'aide de l'algorithme de saut le plus court (SHR) [91].

#### **2.4.5.8 Mobility supporting Adaptive Threshold-based Thermal-aware Energy efficient Multi hop ProTocol**

Mobility supporting Adaptive Threshold-based Thermal-aware Energy efficient Multi hop ProTocol (M-ATTEMPT) proposé en 2013 dans [85], est un protocole de routage développé afin de réduire : la température des nœuds, les délais d'acheminement des données critiques et la consommation d'énergie des nœuds, tout en supportant la mobilité. Il est développé pour les WBANs utilisant des capteurs biomédicaux hétérogènes. M-ATTEMPT suppose que le sink est placé au centre du corps humain et les nœuds sont placés autour du sink dans l'ordre décroissant de leur débit de transmission. Pour supporter la mobilité, les nœuds avec haut débit sont placés dans les endroits moins mobiles dans le corps, et cela pour s'en servir comme nœuds relais aux autres nœuds (en se connectant directement au sink). M-ATTEMPT identifie deux types de transmissions correspondantes aux deux classes de données ; données ordinaires et données critiques. Pour les paquets de données critiques, les biocapteurs augmentent leur puissance de transmission pour transmettre ces paquets directement (à un seul saut) au nœud récepteur (généralement le sink). Cependant, pour les paquets de données ordinaires, une communication multi sauts est utilisée. En fait, les paquets sont routés en suivant les chemins avec minimum de sauts. Cependant, s'il existe plus d'un chemin avec le même nombre de sauts, M-ATTEMPT choisit la route qui consomme moins d'énergie.

Pour contrôler l'augmentation de la température des nœuds, M-ATTEMPT définit un seuil. Si la température d'un nœud voisin dépasse ce seuil, il rompt toutes les routes avec ce nœud. Néanmoins, si la température du nœud atteint le seuil après avoir reçu un paquet de données, il renvoie ce paquet au nœud précédent qui le marque comme hotspot.

Le protocole M-ATTEMPT est composé de quatre phases : phase d'initialisation, phase de routage, phase d'ordonnancement, et la transmission de données. Dans la

phase d'initialisation, tous les nœuds diffusent le paquet *Hello* contenant les informations sur les voisins et le nombre de sauts vers le sink. Dans la phase de routage, les paquets sont routés en utilisant les chemins avec moins de sauts en suivant la procédure susmentionnée. Le sink crée une planification TDMA (Time Division Multiple Access) pour tous les nœuds sources dans la phase de planification, tandis que les nœuds sources envoient leurs données au nœud récepteur pendant la phase de transmission de données.

Bien que M-ATTEMPT supporte la mobilité, cependant il cause un déséquilibre de charge entre les nœuds du réseau où les nœuds proches du sink s'épuisent rapidement.

#### **2.4.5.9 Thermal-Aware Multiconstrained Intrabody QoS Routing**

Thermal-Aware Multiconstrained Intrabody QoS Routing (TMQoS) proposé en 2014 dans [93]. Contrairement aux protocoles à base de température sus discutés qui considèrent uniquement l'augmentation de la température comme le problème le plus important en négligeant les exigences sur le plan qualité de service qui sont nécessaires pour certaines applications WBANs. TMQoS est un protocole thermique (à base de température) qui prend en compte la qualité de service. Il divise le trafic en quatre classes selon les deux contraintes : le délai et la fiabilité. Les classes de trafic sont : 1) pas de retard et avec fiabilité, 2) pas de retard et pas de fiabilité, 3) avec retard et avec fiabilité et 4) avec retard et pas de fiabilité. Il utilise deux files d'attente distinctes pour stocker les paquets, une pour les paquets avec contrainte de retard et l'autre pour les paquets sans contrainte de retard.

TMQoS utilise un framework de routage proactif inter-couches (cross-layer) qui construit une table de routage contenant les informations suivantes, l'ID voisin, le nombre de sauts, le coût de retard estimé, la valeur de fiabilité estimée, et la température du chemin vers le nœud voisin. Ces informations sont mises à l'infini pour chaque nœud hotspot détecté, et aussitôt, tous les nœuds du réseau seront informés de son état. Par conséquent, le nœud hotspot ne peut pas être sollicité dans l'opération de routage.

Les résultats de simulation montrent que TMQoS est plus performant en comparaison avec TARA et LTR. Cependant, pour l'acheminement des paquets

correspondants aux données critiques, il envoie simultanément deux copies de chaque paquet, une vers le nœud voisin assurant le moins de retard tandis que l'autre vers celui assurant la fiabilité la plus élevée. La livraison de paquets de données redondants se traduit par un trafic réseau élevé, une congestion réseau accrue, une consommation d'énergie plus élevée et aussi une augmentation dans la température des nœuds.

#### **2.4.5.10 Mobility-Based Temperature-Aware Routing Protocol**

Mobility-Based Temperature-Aware Routing Protocol (MTR) est proposé en 2017 dans [94]. Le but de ce protocole est de réduire le nombre de paquets perdus à cause du partitionnement de la topologie produit par les mouvements posturaux du corps humain. En d'autres termes, MTR est un protocole qui supporte la mobilité tout en évitant l'augmentation de la température des nœuds. Il est développé pour les WBANs à tolérance de retard (Delay Tolerance Networks *DTN*) en implémentant un schéma de stockage et de transport. Pour ce faire, MTR classe les nœuds en deux classes, les nœuds statiques et les nœuds dynamiques. Les nœuds statiques font référence aux nœuds situés au centre du corps humain qui ne sont pas affectés par les mouvements du corps, tandis que les nœuds dynamiques font référence aux nœuds situés dans la partie mobile du corps (les bras ou les jambes).

Le routage des paquets générés par les nœuds mobiles vers le sink est fait comme suit; si tous les liens avec les nœuds voisins sont rompus, le nœud stocke les paquets dans un tampon. Quand la liaison avec un voisin est rétablie, ces paquets tamponnés seront transmis. Pour un nœud statique  $N_s$ , le routage est semblable à LTR. Les paquets sont envoyés directement vers le sink s'il existe des liaisons. Cependant, si la plus basse température des voisins statiques est élevée,  $N_s$  essaye de router le paquet à travers les nœuds dynamiques. En fait, pour chaque voisin dynamique, il calcule une probabilité  $P$  représentant sa qualité de liaison avec le sink. S'il existe un nœud dynamique  $N_d$  avec  $P$  supérieure à la valeur seuil (préfixée), le nœud  $N_d$  sera choisi comme prochain saut et le paquet lui sera envoyé. En même temps,  $N_s$  déclenche un compteur  $C$  dépendant de la probabilité  $P$  utilisé pour assurer le routage du paquet au cours d'un certain délai. Si toutes les probabilités  $P$  sont inférieures à la valeur du seuil ou après l'écoulement du

compteur  $C$  sans que le paquet soit routé.  $N_s$  envoie son paquet à son voisin statique le plus froid  $N_v$ , et on recommence l'opération de routage statique pour le nœud  $N_v$ .

Bien que MTR supporte la mobilité et prenne en considération la température des nœuds, il ne prend pas en considération le nombre de sauts ce qui peut influencer négativement la durée de vie de réseau.

#### **2.4.5.11 Traffic Control Thermal-Aware Routing in Body Area Networks**

Traffic Control Thermal-Aware Routing in Body Area Networks (TRATC) proposé en 2017 dans [95]. Ce protocole vise à réduire l'augmentation de la température des nœuds tout en contrôlant le trafic réseau. Pour cela, il utilise deux seuils pour contrôler les températures des nœuds et gérer le trafic réseau. D'abord, dans le cas où la température des nœuds serait inférieure au premier seuil, le prochain saut est choisi en fonction du nombre de sauts vers le sink et l'énergie restante. Cependant, si la température d'un nœud dépasse le premier seuil, le taux de trafic envoyé à ce capteur sera contrôlé par ses nœuds voisins. Ensuite, dans la deuxième étape, si le contrôle du trafic n'est pas efficace et que la température du nœud augmente au-delà du deuxième seuil, alors le nœud devient un hotspot. Le trafic sera envoyé au nœud, parmi le reste des voisins, ayant le plus petit nombre de sauts vers le sink (Algorithme SHR est appliqué). Si plusieurs nœuds ont le même nombre de sauts vers le sink, le nœud ayant la plus basse température sera choisi. Dans TRATC, les informations concernant le nombre de sauts vers le sink, les températures et les énergies des nœuds sont échangées périodiquement en utilisant des messages *Hello*.

Les performances du protocole TRATC sont comparées avec les protocoles TLQoS (Thermal-Aware Localized Quality of Service) [96] et THSR (Thermal-Aware Shortest Hop Routing). TRATC s'avère efficace en ce qui concerne la minimisation de température et la réduction des délais d'acheminement. Cependant, il n'y a pas de différence majeure dans la consommation d'énergie pour les trois protocoles à cause de surcout produit par l'envoi périodique des messages hello utilisés pour mettre à jour les tables de routage.

### 2.4.5.12 Trust and Thermal Aware Routing Protocol

Trust and Thermal Aware Routing Protocol (TTRP) est proposé en 2017 dans [97]. Ce protocole garantit la confiance et évite la formation des hotspots dans le réseau. En d'autres termes, il assure que la communication est protégée contre les nœuds non fiables et défectueux. TTRP utilise des nœuds de relais supplémentaires équipés d'une énergie élevée par rapport aux autres nœuds. Ces nœuds n'ont que la fonction de recevoir et de transmettre les paquets des autres nœuds capteur (ils ne participent pas à la collecte des données).

Le protocole TTRP implémente trois phases; la phase d'estimation de confiance, la phase de découverte de routage et la phase de maintenance de routage. La phase nommée estimation de confiance est chargée d'estimer la fiabilité des nœuds de relais (la Figure 2. 10), en particulier par estimation du tampon des nœuds  $R_i$  et  $R_j$ , pour déterminer si le nœud  $R_k$  est non fiable.

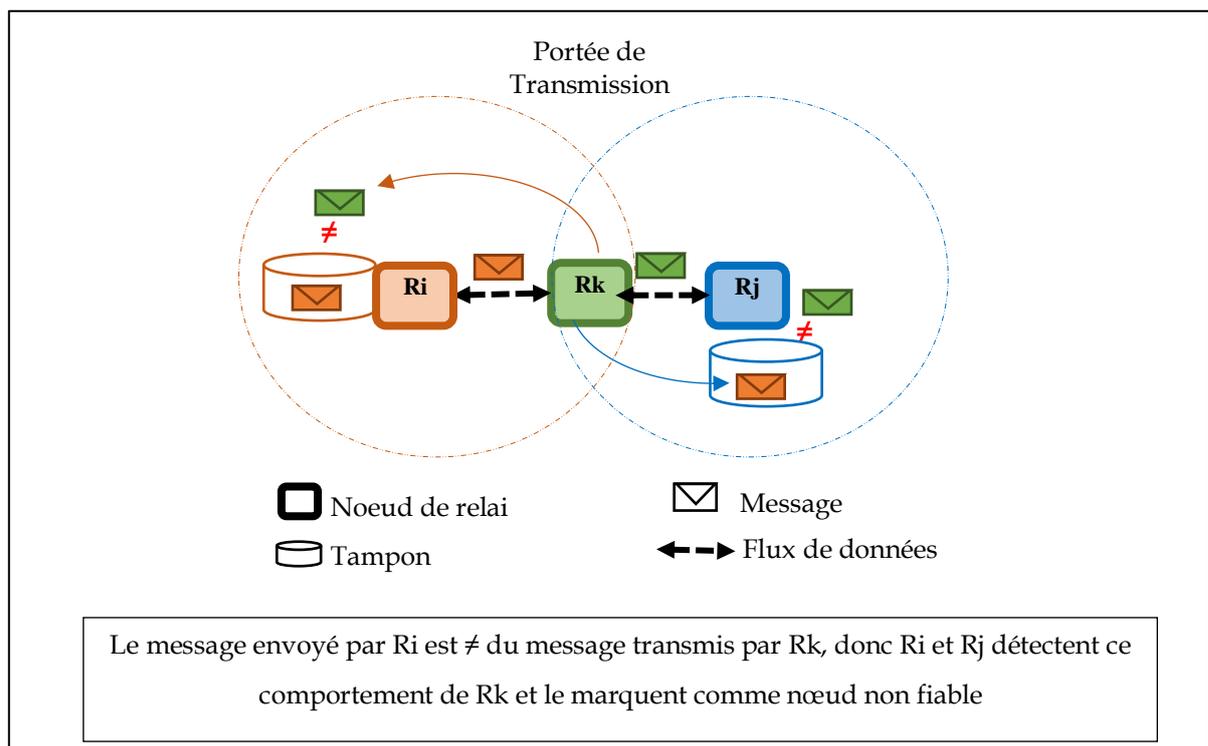


Figure 2. 10 : Diagramme d'estimation de fiabilité des nœuds de relais

La phase de découverte d'itinéraire a pour tâche de trouver, dans le réseau, un itinéraire assurant la confiance et sans hotspot pour la transmission de données. La dernière phase est celle de maintenance de la route, qui traite la défaillance de la liaison.

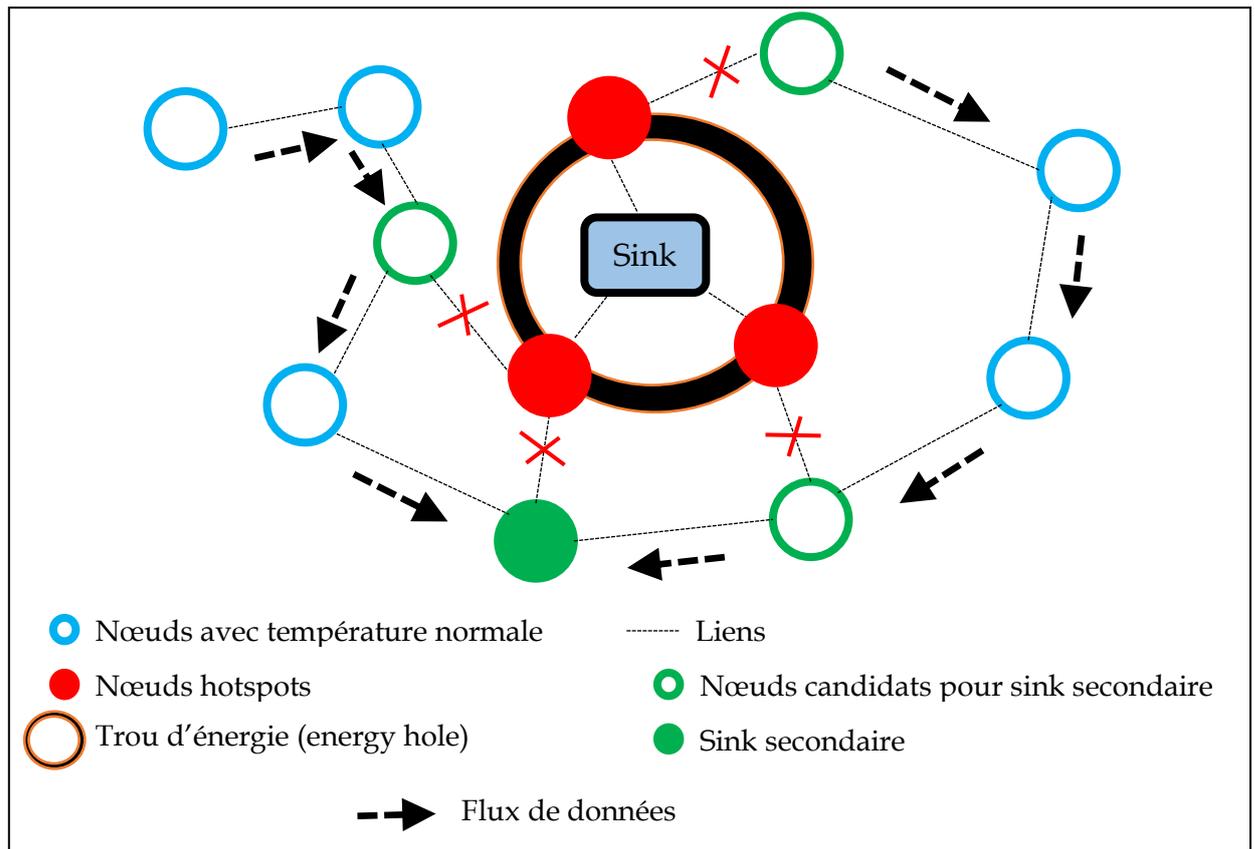
Si un nœud devient un hotspot pendant la communication ou si le nœud voisin devient non fiable, il relance la phase de découverte de la route.

Bien que le protocole TTRP assure la fiabilité des nœuds de relai, il n'offre aucune garantie en ce qui concerne les nœuds capteurs, en outre, il utilise des messages de contrôle qui peuvent réduire la durée de vie de réseau et augmenter les délais de bout en bout.

#### **2.4.5.13 Temperature-Aware Routing using Secondary Sink in Wireless Body Area Sensor Network**

Temperature-Aware Routing using Secondary Sink in Wireless Body Area Sensor Network (TAR-SS) proposé en 2018 dans [98]. Le protocole est développé pour surmonter le problème de trou d'énergie (Energy Hole Problem) [99]. Le trou d'énergie désigne le fait que les nœuds voisins du sink souffrent d'un trafic élevé. Ils sont très sollicités pour router les données des nœuds non voisins au sink. Ils souffrent de l'augmentation dans leurs températures et une consommation rapide de leurs énergies (Figure 2. 11).

Pour remédier à ce problème, le protocole TAR-SS introduit la notion de sink secondaire. D'abord le sink principal détecte une situation de trou d'énergie en surveillant périodiquement la température et le niveau d'énergie de ses voisins. Quand la température de tous ces voisins atteint la valeur de seuil ( $T_{thresh}$ ), cela signifie qu'une situation de trou d'énergie est détectée. Dans ce cas, TAR-SS lance l'opération d'élection du sink secondaire parmi les nœuds à deux sauts du sink principal. Le sink secondaire sera le nœud ayant la valeur maximale de la fonction cout calculée à base de l'énergie résiduelle et la température du nœud. Après l'élection du sink secondaire, le sink principal diffuse un message hello contenant l'identifiant de ce nouveau sink secondaire à tous les nœuds du réseau. Le sink secondaire joue le rôle de sink principal pendant la période de trou d'énergie, il est utilisé pour permettre aux nœuds voisins du sink principal de refroidir (Figure 2. 11). Si le sink secondaire devient un hotspot; il informe le sink principal qui à son tour lance une nouvelle opération d'élection d'un nouveau sink secondaire.



**Figure 2. 11 :** Exemple de fonctionnement du protocole TAR-SS

Le protocole TAR-SS identifie deux classes de paquets, prioritaires et ordinaires. Les paquets prioritaires sont envoyés immédiatement vers le sink. Cependant les paquets ordinaires, sont envoyés par groupe. En d'autres termes, quand un nœud génère ou reçoit un paquet ordinaire (d'un nœud voisin), il le met dans un tampon et quand le tampon sera plein, il route tous les paquets à la fois.

Bien que l'idée du sink secondaire permette de remédier au problème de trou d'énergie, le protocole TAR-SS n'est efficace que dans le réseau à faible et moyen trafic. Il augmente le retard lors du trafic élevé, de plus, l'énergie de sink secondaire diminue plus rapidement que les autres nœuds du réseau ce qui génère un déséquilibre de charge entre les nœuds de réseau.

#### 2.4.5.14 Adaptive Thermal-Aware Routing Protocol

Adaptive Thermal-Aware Routing Protocol (ATAR) proposé en 2019 dans [100]. Ce protocole tente de répartir uniformément la charge entre les nœuds de réseau dans le contexte de l'élévation de température. Comme TTRP, ATAR utilise des nœuds relais

supplémentaires équipés d'une énergie élevée, qui n'ont que la fonction de retransmettre les paquets des autres nœuds capteurs. Il met en œuvre deux phases : la phase d'initialisation et la phase de transmission de données. La phase d'initialisation consiste à répartir les nœuds à des niveaux qui représentent leur distance vers le sink en ce qui concerne le nombre de sauts. À la fin de cette phase, chaque nœud construit sa table de routage contenant les routes vers le sink avec leurs températures globales.

Dans la phase de transmission de données, le nœud sélectionne le nœud relais dans la route ayant la plus basse température comme prochain saut, et diffuse le paquet contenant son niveau, sa température et l'ID du nœud relais. Lorsque le nœud relais spécifié reçoit le paquet, il le rediffuse. Cependant les nœuds de niveau plus élevé conservent l'ID et la température du nœud émetteur et rejettent le paquet. Le paquet sera rejeté sans aucune action par les autres nœuds. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le paquet soit reçu par le sink.

Bien que le protocole ATAR réduise l'augmentation des températures des nœuds. La technique de découpage du réseau en anneaux n'est pas un choix préférable pour les WBANs à cause de leurs contraintes énergétiques. Cette opération de découpage, le maintien des informations concernant : ce découpage, la température et le nombre de sauts pour atteindre le sink dans les nœuds de réseau entraînent un surcoût qui réduit la durée de vie de réseau.

#### **2.4.5.15 Thermal Aware Routing Algorithm for a wireless body area network**

Thermal Aware Routing Algorithm for a wireless body area network est proposé en 2019 dans [101]. C'est un protocole proposé pour assurer un routage en respectant la priorité des paquets tout en évitant l'augmentation de la température des nœuds.

Le protocole est composé de deux phases. Dans la phase d'initialisation, les nœuds échangent les paquets Hello suite à l'initiative de sink. Un paquet Hello contient les informations suivantes : l'identifiant du nœud, le nombre de saut vers le sink, sa température et son niveau d'énergie. Ces informations seront utilisées pour la construction des tables de routage. Quand un nœud reçoit les messages hello de ces voisins, il ajoute ces informations dans sa table de routage et déduit son nombre de sauts vers le sink, qui sera le minimum des nombres de sauts de ces voisins + 1.

Dans la phase de routage, chaque paquet généré par un nœud est marqué avec une priorité haute ou basse (élevée ou faible) qui dépend de l'application ou de la position du nœud. Ensuite, le paquet sera envoyé au nœud voisin non hotspot ayant la plus grande valeur de la fonction objectif  $F$  calculée à base de quatre paramètres; nombre de sauts, taille de réseau, température et énergie. Ainsi, la fonction  $F$  permet de choisir le prochain saut qui est à une distance optimale du sink, avec une température admissible et une énergie suffisante. Si tous ces voisins sont des hotspots, le paquet sera tamponné. Si le tampon est plein, le plus ancien paquet avec la plus basse priorité sera supprimé pour libérer de l'espace. Pour gérer les priorités des paquets, trois états  $E0$ ,  $E1$  et  $E2$  sont définis pour chaque nœud selon sa température. D'abord le protocole utilise deux seuils pour la température,  $NTemp$  et  $ThrTemp$  où  $NTemp$  est inférieure à  $ThrTemp$ . Un nœud est dans l'état  $E0$  si sa température est inférieure à  $NTemp$ , signifiant qu'il peut transmettre les paquets à haute et à basse priorité. Il est dans l'état  $E1$  si sa température est comprise entre  $NTemp$  et  $ThrTemp$ , signifie qu'il peut transmettre uniquement les paquets à haute priorité, pour les paquets à faible priorité, il les tamponne. Un nœud est dans l'état  $E2$  synonyme à un hotspot si sa température est plus grande que  $NTemp$ , et dans ce cas le nœud ne participe pas dans le routage et entre dans une phase de refroidissement.

Bien que ce protocole gère la priorité des messages tout en minimisant l'augmentation des températures des nœuds. Mais vu la taille réduite des mémoires de biocapteurs utilisées pour tamponner les paquets quand le nœud est l'état  $E1$ , et le mécanisme de suppression des anciens paquets. La performance du réseau est négativement réduite à cause de perte de données.

#### **2.4.5.16 Thermal Aware & Energy Optimized Routing Protocol for WBANs**

Thermal Aware & Energy Optimized Routing Protocol for Wireless Body Area Networks (TAEO-A) proposé en 2019 dans [102]. Il est proposé pour réduire l'effet de surchauffe et augmenter la fiabilité du réseau. Initialement, les nœuds échangent les informations en ce qui concerne leurs identifiant, position, température, et niveau d'énergie. Ensuite, le sink diffuse un message indiquant sa position.

Pour le routage des données, les nœuds proches du sink envoient directement leurs données vers le sink. Cependant pour les autres nœuds, le multi sauts est utilisé. Pour cela, le nœud voisin ayant la température la plus basse, plus proche au sink avec une énergie résiduelle plus élevée est sélectionné comme nœud de transmission (forwarder node). Sa tâche est de collecter les données de ses voisins et les faire acheminer vers le sink. Si la température d'un nœud de transmission voisin est supérieure à la valeur seuil, le nœud sera désactivé pour une certaine durée. TAE0-A ne définit pas une valeur constante de la température limite, sa valeur dépend de la position du capteur dans le corps. Ainsi, différentes valeurs peuvent être utilisées pour différentes positions. Pour économiser l'énergie, le protocole TAE0-A définit l'énergie de transmission à utiliser selon la distance qui sépare deux nœuds, il envoie le paquet avec l'énergie minimale si la distance est inférieure à une distance limite, sinon, il utilise l'énergie de transmission maximale. TAE0-A utilise un ordonnancement de type TDMA (Time Division Multiple Access), chaque nœud envoie ses données dans son laps de temps, s'il n'a pas de données à envoyer, il entre dans un état de veille pour économiser son énergie.

Les résultats de simulation montrent que le protocole TAE0-A augmente la durée de vie, le débit et la stabilité du réseau en comparaison avec ATTEMPT et SIMPLE [58]. Cependant, le protocole ne prend pas en compte la priorité des données qui est très importante notamment pour les applications de surveillance des malades dans le domaine médical.

Le *tableau 2.5* résume les caractéristiques des protocoles sus discutés.

**Tableau 2.5 :** Protocoles à base de température

N°	Protocole Année	Objectif/méthodologie	Routage dépend de	Métriques de performance	Comparé avec	Rejet de paquet	Msgs de contrôle	Priorité de données	Nœuds de relai	Limitation
1	TARA 2005	Réduire la surchauffe des nœuds en évitant d'acheminer les paquets à travers les hotspots	Température des nœuds	Température max, temp moyenne, les délais d'acheminement	SHR					Surcharge réseau, durée de vie de réseau réduite, délais d'acheminement élevé
2	LTR 2006	Réduire la quantité de chaleur produite dans le réseau	Température des nœuds	Température moyenne, délai, consommation d'énergie, paquets rejetés/livrés, durée de vie de réseau	SHR, TARA	✓				Délais d'acheminement élevés, surcharge réseau
3	ALTR 2006	Réduire la quantité de chaleur produite dans le réseau et réduire les délais	Température des nœuds puis nbr sauts	Température moyenne, délai, consommation d'énergie, paquets rejetés/livrés, durée de vie de réseau	SHR, TARA					Délais d'acheminement des paquets élevé, créer des hotspots
4	LTRT 2008	Réduire le nbr de sauts et router les paquets en utilisant la route ayant la température la plus basse	Température totale des routes	Température moyenne, nombre de sauts pour les paquets délivrés	LTR, ALTR, SHR		✓			Surcharge réseau, Créer des hotspots, durée de vie de réseau réduite
5	HPR 2008	Eviter la création des hotspots et réduire les délais d'acheminement des paquets	Température des nœuds	Température max pour chaque nœud, taux de paquets rejetés, temps moyen de délivrance des paquets, durée de vie de réseau	TARA, SHR	✓				Durée de vie de réseau réduite
6	RAIN 2008	Minimiser les délais d'acheminement et réduire l'augmentation de température	Température des nœuds	Pour tous les nœuds (Température max, énergie moyenne consommée), Pour les paquets (taux des paquets délivrés, délais d'acheminement moyen)	Controlled- FLOOD	✓	✓			Surcharge réseau, délais d'acheminement des paquets élevé
7	TSHR 2009	Réduire : l'augmentation de température, délai d'acheminement. Éviter le rejet des paquets	Température des nœuds puis nbr sauts	Température maximale, délais moyens, durée de vie de réseau, nbr de paquet rejetés	SHR, TARA, LTR, HPR, TSHR					Durée de vie de réseau réduite
8	M- ATTEMP T 2013	Réduire la température des nœuds, les délais d'acheminement des données critiques, consommation d'énergie. Supporter la mobilité et l'hétérogénéité des nœuds	Temp des nœuds, nb de sauts et énergie totale de la route	Nombre de nœuds morts, débit, nombre de chef de cluster par tour, énergie totale du réseau	Multi-sauts			✓		Déséquilibre de charge entre les nœuds de réseau

N°	Protocole Année	Objectif/méthodologie	Routage dépend de	Métriques de performance	Comparé avec	Rejet de paquet	Msg de contrôle	Priorité de données	Nœuds de relai	Limitation
9	TMQoS 2014	Assurer la qualité de service (délai, fiabilité) et limiter l'augmentation de la température	Temp des nœuds, QoS demandée	Taux des paquets délivrés, température maximale pour trafic exigeant les délais et celui exigeant la fiabilité.	LTRT, TARA		✓	✓		Charge élevée, augmentation de température, consommation d'énergie élevée
10	MTR 2017	Supporter la mobilité et éviter l'augmentation de température	Temp des nœuds, Probabilité d'atteindre le sink	Délai d'acheminement, taux de paquets délivrés, nombre des hotspots vs nombre des nœuds dynamiques	LTR					Délais de bout en bout élevés, n'évite pas la création des hotspots, surcharge de réseau
11	TRATC 2017	Contrôler le trafic réseau pour éviter l'augmentation de la température des nœuds	Traffic d'un nœud puis sa température	Augmentation de température, consommation d'énergie, délais d'acheminement, taux de paquets délivrés	TSHR, TLQOS		✓			Ne supporte pas la mobilité, surtout des messages de contrôle périodiques
12	TTRP 2017	Assurer la fiabilité des nœuds et éviter la formation des hotspots	Fiabilité et température des nœuds	Température moyenne du réseau, débit, délai moyen de bout en bout, taux des paquets rejeté	TARA, HPR	✓	✓	✓	✓	Délai de bout en bout élevé.
13	TAR-SS 2018	Surmonter le problème de trou d'énergie	Température des nœuds	Taux de paquets délivrés, délai moyen d'acheminement, énergie résiduelle moyenne du réseau, température moyenne du réseau	TSHR, M-ATTEMPT		✓	✓		Charge élevée, équipement rapide du nœud secondaire, n'est pas adéquat pour les réseaux à trafic élevé
14	ATAR 2019	Répartir uniformément la charge entre les nœuds dans le contexte de l'élévation de température	Température des nœuds	Augmentation de température, débit	SHR, TARA, MRRP		✓		✓	Surcoût causé par l'opération de découpage en annaux, priorité des messages négligée
15	TARALG 2019	Assurer un routage avec priorité des données en réduisant la température	Fonction (temp, éner, nbr sauts)	Durée de vie de réseau, consommation d'énergie, taux de paquets délivrés et délais Hotspots générés, augmentation de température, nombre de sauts	TARA, LTR, ALTR	✓				Risque de perte de données importantes à cause de mécanisme de rejet de paquet
16	TAE0-A 2019	Réduire l'effet de surchauffe et augmenter la fiabilité du réseau	Energie et température des nœuds, La distance vers le sink	Augmentation de température, consommation d'énergie, délais d'acheminement, taux de paquets délivrés	ATTEMPT, SIMPLE					Mobilité non supportée Priorité de données non traitée

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation générale du routage dans les WBANs, nous avons évoqué les défis et les difficultés qu'un protocole de routage doit surmonter. Plusieurs protocoles de routage ont été développés, ces protocoles sont classés dans les catégories suivantes : à base de qualité de service, à base de cluster, à base de posture, à base de cross layer et à base de température. Chaque catégorie vient à relever certains défis des WBANs. Nous avons donné une explication concernant le principe de chaque catégorie tout en montrant les caractéristiques des protocoles les plus connus de chaque catégorie.

Nous avons détaillé la majorité des protocoles de routage à base de température. La plupart de ces protocoles considèrent la température comme la métrique de base pour établir les chemins de routage. Cependant, ils n'ont pas pris vraiment en compte l'énergie des nœuds comme métrique de routage, ce qui justifie leur limitation sur le plan durée de vie du WBAN qui est primordiale, notamment pour les applications médicales.

Dans le dernier chapitre et pour remédier à cette limitation, nous allons proposer un nouveau protocole de routage à base de température qui vise à augmenter la durée de vie du WBAN tout en minimisant l'élévation de température des nœuds. Nous allons commencer par la description du travail que nous avons fait et nous finirons par l'exposition des différents résultats obtenus.

# 3

## **Contribution : Protocole de Routage à base de température pour les Wireless Body Area Networks**

### **3.1 Introduction**

La classe des protocoles de routage à base de température est la classe qui a tiré plus l'attention des chercheurs, ils ont proposé plusieurs protocoles appartenant à cette classe. L'étude de la littérature faite sur les protocoles de cette classe a permis de voir que l'énergie des nœuds capteurs est complètement ignorée par la majorité des protocoles de cette classe pourtant, elle a un impact direct sur la durée de vie de WBAN. D'ailleurs, uniquement les deux protocoles les plus récents TARALG [101] et TAE0-A [102] qui ont considérée l'énergie des nœuds comme métriques de routage. Cette ignorance à poser un problème concernant la durée de vie du réseau où tous les protocoles souffrent de cette limitation.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage qui vise à prolonger la durée de vie du WBAN. Nous décrivons l'implémentation du protocole ainsi que les étapes suivies lors de la simulation et nous discutons les résultats de simulation obtenus.

## **3.2 Critique des protocoles de routage à base de température**

L'étude de la littérature faite sur les protocoles de routage à base de température nous a permis de tirer la remarque essentielle que l'énergie des nœuds capteurs est complètement ignorée par la majorité des protocoles de cette classe. Le budget énergétique a un impact direct sur la durée de vie de WBAN. D'ailleurs, seulement les deux protocoles les plus récents TARALG [101] et TAEO-A [102] ont considérée l'énergie des nœuds comme métriques dans le routage.

Comme le protocole TARA [10], les autres protocoles TARP (thermal aware routing protocol) récents LTR [87], ALTR [87], LTRT [88], HPR [11], RAIN [90], TSHR [92], TMQoS [93], etc. n'ont pas considéré la consommation d'énergie des nœuds capteurs dont sa mauvaise gestion peut réduire significativement la durée de vie de WBAN qui peut conduire à une catastrophe. Cependant, ces protocoles tentent implicitement de résoudre le problème de consommation d'énergie par :

(a) réduire la duplication des paquets (comme RAIN [90]) et limiter la retransmission des paquets inutilement dans le réseau comme LTRT [88], ALTR [87], HPR [11], RAIN [90].

(b) Appliquer l'algorithme SHR pour choisir les chemins de routage les plus courts en termes de nombre de sauts, c'est une stratégie adopter par la majorité des protocoles comme TARA [10], LTRT [89], HPR [11] and TSHR [93], ALTR [88], etc. Cette technique réduit les délais d'acheminement des paquets efficacement, cependant, le chemin le plus court n'est pas toujours optimal en termes de consommation d'énergie car les nœuds situés dans le chemin le plus court souffrent de surcharge et s'épuisent rapidement, ce qui peut affecter le fonctionnement et l'existence du réseau (Figure 3.1).

(c) Une autre solution adoptée par certains protocoles récents comme TTRP [97] et ATAR [100] stipule l'existence de nœuds de relais dont la seule tâche est de recevoir et transmettre les paquets des capteurs, tandis que ces derniers collectent et transmettent uniquement leurs informations collectées.. Cette technique peut prolonger la durée de vie du réseau en réduisant la consommation d'énergie des nœuds capteurs. Cependant, la durée de vie du réseau est fortement reliée à ces nœuds de relais. En outre, l'ajout

d'équipements supplémentaires sur le corps humain, en plus du surcôt matériel, peut affecter les personnes et perturber leur confort.

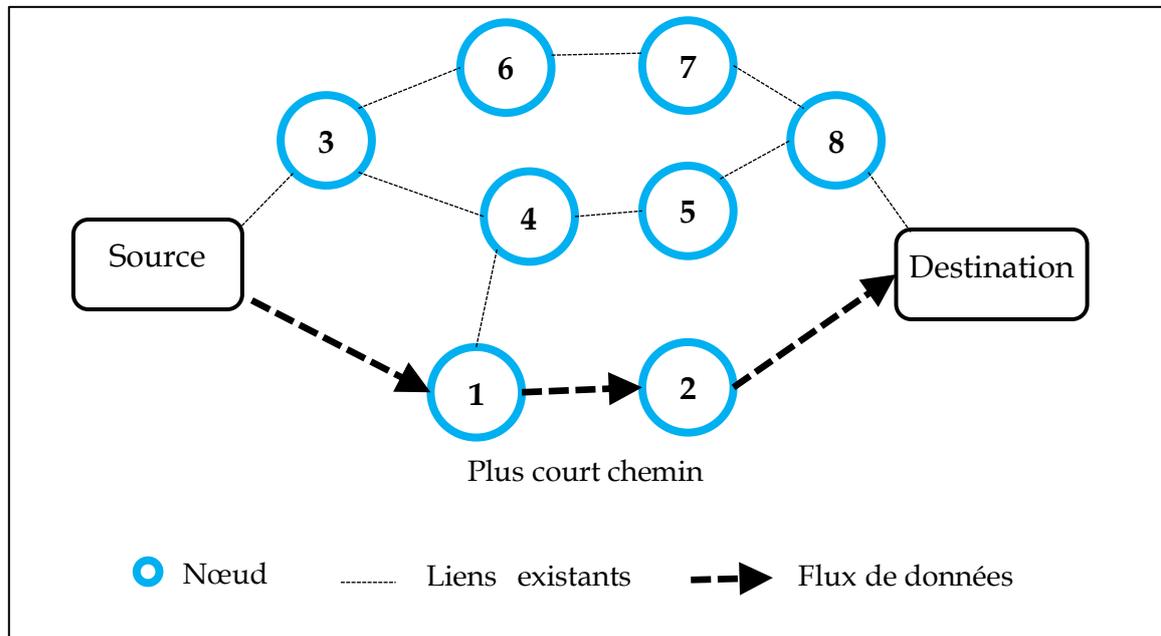


Figure 3.1 : Routage à base de protocole SHR

Donc comme nous pouvons voir, l'énergie des nœuds n'est pas considérée dans l'opération de routage (lors de la sélection des chemins de routage) par les protocoles de routage thermiques malgré qu'elle soit cruciale et un facteur essentiel pour prolonger la durée de vie du WBAN.

### 3.3 Protocole proposé

#### 3.3.1 Présentation de HTTRP

Nous proposons High Throughput and Thermal aware Routing Protocol (HTTRP), un protocole de routage thermique et économe en énergie. Il s'agit d'un protocole de routage qui prend en considération la température des nœuds et leurs énergies. En d'autres termes, le chemin de routage est sélectionné sur la base de la température et de l'énergie du nœud. Avec HTTRP, le chemin de routage est déterminé non seulement en fonction de la température (comme les autres protocoles TAR) mais également en fonction du niveau d'énergie des nœuds capteurs implantés dans le corps.

Ainsi, HTTRP vise à réduire la surchauffe des capteurs qui peut endommager les organes thermosensibles du corps humain et certains tissus et à prolonger la durée de vie du réseau par une gestion adéquate de l'énergie des capteurs.

### **3.3.2 Modèle de système et hypothèses préliminaires**

Dans cette section nous décrivons les préliminaires de l'approche proposée en présentant le modèle de réseau et en introduisant les hypothèses et les notations utilisées.

#### **3.3.2.1 Modèle de réseau**

Le protocole de routage proposé est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les emplacements des biocapteurs sont prédéfinis car ils sont physiquement placés sur le corps humain plutôt qu'aléatoirement déployés comme dans d'autres applications de réseaux de capteurs. En outre, l'emplacement des voisins est connu les uns des autres après l'exécution de la phase d'initialisation.
- Les biocapteurs sont implantés dans le tissu sous-cutané et génèrent périodiquement des paquets qui doivent être envoyés au nœud collecteur (sink), ce dernier agrège les données et les transmet à une station de base située à l'extérieur du corps. Le sink contrairement aux autres nœuds est doté de capacités élevées en ce qui concerne les ressources énergétiques, la puissance de traitement et la force de transmission.
- Chaque nœud capteur possède une antenne omnidirectionnelle et aucun nœud capteur n'est déconnecté du réseau. Les nœuds échangent des paquets de taille fixe et chaque nœud transmet ses données durant son laps de temps (un ordonnancement de type TDMA est utilisé).
- La topologie du WBAN est maillée, chaque nœud capteur possède une puissance et une portée de transmission maximales limitées. Les données d'urgence sont envoyées directement au sink, cependant, pour les données normales, elles sont acheminées vers le sink via des chemins multi-sauts.

### 3.3.3 Description du protocole HTTRP

Dans notre protocole, la transmission des données est basée sur des informations locales sur la température et l'énergie des nœuds capteurs. Un nœud dont sa température dépasse le seuil (valeur prédéfinie) est marqué par ses voisins comme un hotspot et il ne sera pas impliqué dans le routage. Dans la sous-section suivante, nous décrivons les étapes principales de notre protocole.

#### 3.3.3.1 Phase d'initialisation

Dans cette phase, le nœud collecteur (sink) initie et diffuse un message *HELLO*. Ce message est transmis d'un nœud à un autre jusqu'à atteindre tout le réseau. Il contient des informations concernant les voisins comme le nombre de sauts à partir du sink, la température et le niveau d'énergie comme indiqué sur la Figure 3.2. A la réception du message *HELLO* par un nœud, il conserve les informations, contenues dans le message, dans sa table de routage. Ensuite il met à jour le message *HELLO* en incrémentant le nombre de saut et insérant ses propres informations concernant la température et le niveau d'énergie, puis rediffuse le message. Ainsi, à la fin de cette phase, chaque nœud peut établir sa liste de voisins avec leurs informations respectives (nombre de sauts vers le sink, la température et le niveau d'énergie).

ID_nœud	Nombre de sauts	Energy Résiduelle	Température
---------	-----------------	-------------------	-------------

Figure 3.2 : Format du message HELLO

#### 3.3.3.2 Phase de routage

Dans cette phase, les données collectées par les différents nœuds doivent être envoyées au sink. Dans notre approche, nous considérons deux types de données, les données d'urgence et les données normales. Pour les données d'urgence et en raison de leur nature urgente, les nœuds les envoient directement au sink en utilisant une communication à saut unique. Cependant, la transmission de données normales repose sur deux paramètres : la température du nœud qui doit être minimale, et son énergie résiduelle qui doit être maximale. Afin d'assurer la sélection du chemin qui réduit la surchauffe des nœuds capteurs et équilibre la dépense énergétique des nœuds lors de la transmission des données, nous avons défini une fonction objectif  $F_i(T, E)$  qui combine

la température et l'énergie du nœud lors de la sélection du prochain nœud relais. Ainsi, un nœud émetteur sélectionne dans sa table de voisinage le voisin non hotspot ayant la valeur maximale de la fonction  $F_i$  définie comme suit :

$$F_i(T, E) = \frac{E_i}{T_i} \quad (3)$$

Où  $E_i$  est l'énergie résiduelle du nœud voisin  $i$  et  $T_i$  est sa température.

Si deux voisins ont la même valeur de  $F_i$  avec le même niveau d'énergie, le voisin ayant moins de saut vers le sink est choisi comme prochain saut.

Afin d'économiser l'énergie des nœuds, nous adoptons les stratégies ci-dessous : un nœud envoie ses données capturées uniquement si elles sont différentes des données précédemment envoyées ; en d'autres termes, les nœuds ne dépensent leur énergie que pour des données utiles. Le paquet d'accusé de réception est utilisé efficacement. Pour expliquer le principe, considérons  $N_e$  un nœud émetteur et  $N_r$  le nœud récepteur. Dans le cas normal, lorsque  $N_r$  reçoit un paquet de  $N_e$ ,  $N_r$  envoie un paquet d'accusé de réception dans un court laps de temps, contenant son énergie résiduelle et sa température (**Figure 3. 3**). Lors de la réception du paquet d'accusé de réception du  $N_r$ ,  $N_e$  met à jour les informations correspondantes dans sa table de routage, également tous les nœuds qui reçoivent ce paquet d'accusé de réception mettent à jour leur table de routage. Si  $N_r$  est un point chaud (sa température dépasse la valeur du seuil prédéfini),  $N_r$  n'envoie pas d'acquiescement à  $N_e$  (ceci pour conserver l'énergie du nœud et accélérer son refroidissement). Après l'expiration de  $T_{ack}$  (un compteur déclenché par  $N_e$  en attendant l'acquiescement de son message),  $N_e$  comprend que  $N_r$  est un hotspot, il le marque dans sa table de routage, puis il essaie d'envoyer le paquet à un autre voisin disponible. Si tous les voisins sont des hotspots, dans ce cas,  $N_e$  doit attendre leurs refroidissements pendant une période de temps fixe. La température d'un nœud hotspot qui ne fait aucune activité pendant une période de temps baissera et encore il pourra être sollicité pour l'opération de routage.

ID_émetteur	Energy Résiduelle	Température	ID_destination
-------------	-------------------	-------------	----------------

**Figure 3. 3 :** Format du message d'acquiescement

Le principe du protocole HTRRP est illustré dans la Figure 3.4 par un organigramme, son pseudo code est donné dans l'algorithme 1.

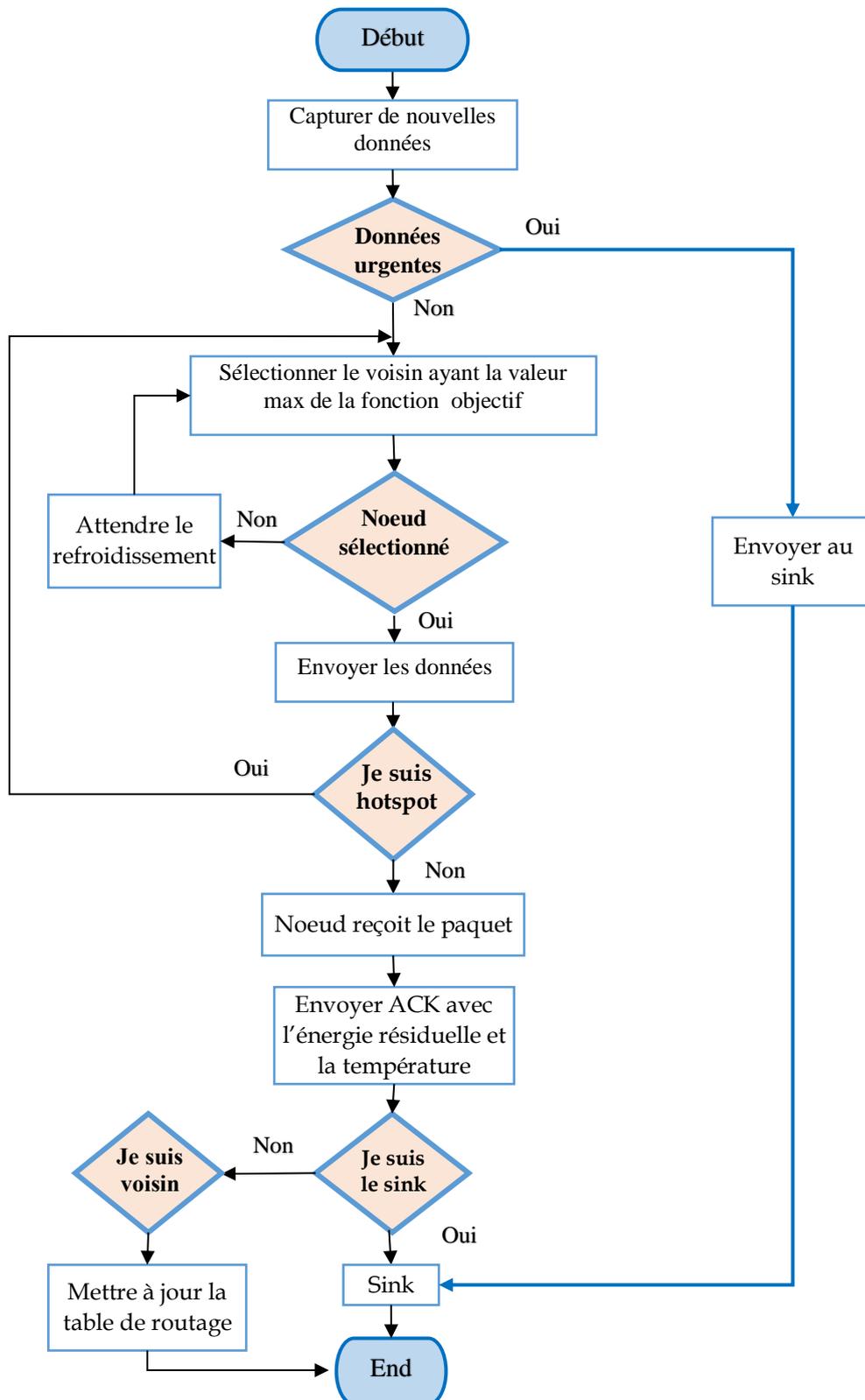


Figure 3.4 : Organigramme du protocole HTRRP

---

### Algorithm1 : algorithme de Routage de HTRP

---

```
global variables
Struct Neighbor{
  Neighbor.@
  Neighbor.temp
  Neighbor.energ
  Neighbor.f}
Struct NeighborRecord{
  id: identifier
  NeighborInfo: Neighbor}
Struct packet {
  Source
  Temp
  Energy
  Data
  Destination}
Struct ACK {
  source
  Temp
  Energy
  Destination}
Nexthop
EmergencyData
End global variables
If EmergencyData then
  Send_packet(Sink)
else
  SelectNeighborRecord([size])
  Nexthope ← 0
  for i from 0 to size-1 do
    if (NeighborInfo[i].T < Threshold) then
      NeighborInfo[i].f ← NeighborInfo[i].temp * (1/NeighborInfo[i].energ)
    end
    if (NeighborInfo[i].f > NeighborInfo[Nexthope].f) then
      Nexthope ← i
    end
  end
  if Nexthope = 0 then
    Wait(t);    »all neighbors are hotspots
  else
    Send_packet (NeighborInfo[Nexthop].@)
  endif
end
```

---

#### À la réception d'un paquet de données

---

```
if node.T < threshold then
  send (ACK)
else
  discardPacket();
endif
```

---

#### À la réception d'un ACK

---

```
NeighborInfo[ACK.source].T = ACK.T
NeighborInfo[ACK.source].E = ACK.E
```

---

### 3.3.4 Implémentation et simulation

#### 3.3.4.1 Analyse de la consommation d'énergie

Dans les réseaux de capteurs sans fil, l'énergie consommée par un nœud de capteur est essentiellement due aux opérations suivantes : capture de données, traitement de données et communication de données. Plusieurs modèles de consommation d'énergie ont été proposés pour étudier et évaluer les différents types de dissipation d'énergie dans ces réseaux [52, 88, 103]. En raison de la consommation d'énergie élevée par la communication de données, la plupart des modèles de consommation d'énergie se concentrent davantage sur l'évaluation de l'énergie de communication. La quantité d'énergie consommée par l'opération de communication de données dépend principalement du mode de communication utilisée : mono-saut ou multi-saut.

Dans [52], les auteurs ont proposé un modèle de consommation d'énergie qui ne prend en compte que les énergies de transmission et de réception. Ainsi, selon ce modèle, pour transmettre un message de longueur  $k$  bits entre un émetteur et un récepteur à une distance  $d$  (en mètres); le module radio de l'émetteur dépense la quantité d'énergie (en Joules) donnée par l'équation (4) suivante :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d), \quad (4)$$

Pour recevoir ce message, le module radio du récepteur dépense la quantité d'énergie (en Joules) donnée par l'équation (5) suivante :

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) \quad (5)$$

Dans ces deux équations,  $E_{Tx-elec}$  et  $E_{Rx-elec}$  représentent respectivement l'énergie électronique de l'émetteur et celle du récepteur où :

$$E_{Tx-elec} = E_{Rx-elec} = E_{elec} = 50 \text{ nJ} / \text{bit} \quad (6)$$

$$E_{amp} = 100 \text{ pJ} / \text{bit} / \text{m}^2 \quad (7)$$

où  $\varepsilon_{amp}$  est l'énergie utilisée par l'amplificateur d'émission, c'est le composant le plus critique du sous-système émetteur, il représente la source majeure de drainage d'énergie, plus de détails peuvent être trouvés dans [104].

Selon les équations (4), (5), (6) et (7), les quantités d'énergie dépensées pour la transmission ( $T_x$ ) et la réception ( $R_x$ ) d'un message de longueur  $k$  bits à une distance  $d$  peuvent s'écrire respectivement :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2 \quad (8)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k \quad (9)$$

La Figure 3. 5 illustre ce modèle de consommation énergétique.

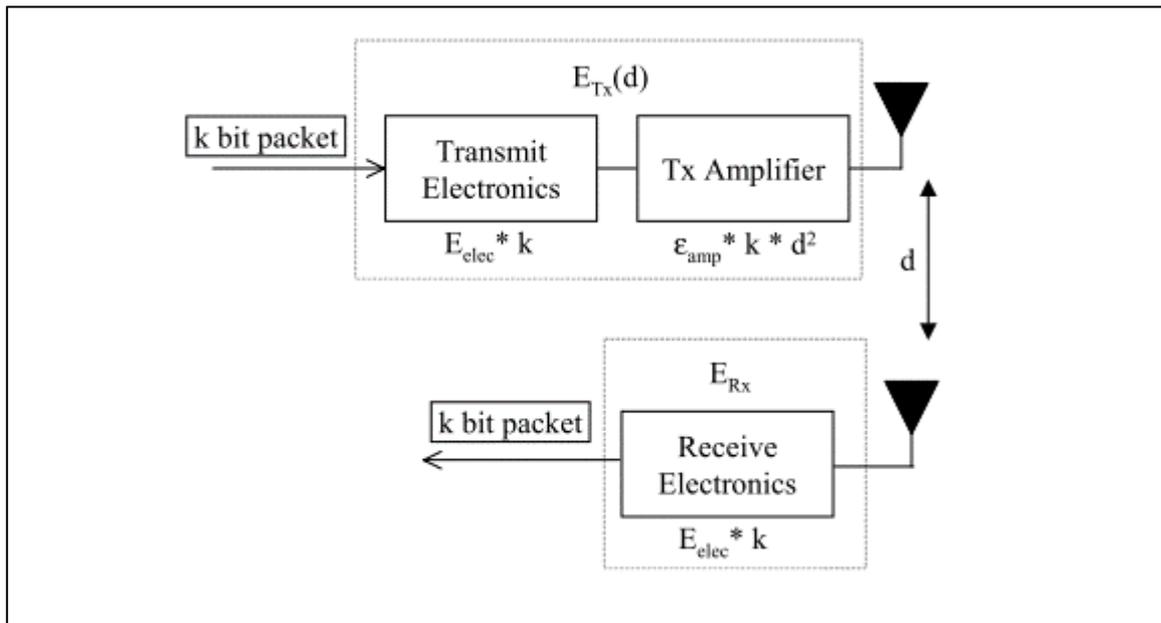


Figure 3. 5 : Modèle de consommation d'énergie [52]

### 3.3.4.2 Modèle de simulation

Afin de prouver l'efficacité et les performances de l'approche proposée, nous avons réalisé des simulations sous MATLAB sur une machine dotée d'un processeur Intel i5 et 6 Go de RAM. Les simulations faites sont basées sur le modèle réseau et les hypothèses cités dans la section 3.3.2 en utilisant les paramètres décrits dans le Tableau 3. 1. Les performances de notre protocole sont comparées avec un représentant des protocoles de routage à base de température qui est le protocole TARA. On fait les comparaisons en se concentrant sur la durée de vie du réseau, l'équilibrage des charges, le débit et le nombre de hotspots générés. La consommation d'énergie est calculée à l'aide du modèle décrit dans la section précédente (3.3.4.1).

**Tableau 3. 1 :** Paramètres de simulation

Paramètre	Définition	Valeur Initiale	Unité de mesure
$x, y$	Coordonnées d'un nœud	Position Prédéfinie	Mètre
E0	Énergie initiale	] 0, 0.1]	Joule
ETx	Énergie de Transmission	50	Nano Joule/bit
ERx	Énergie de Réception	50	Nano Joule/bit
Eelec	Énergie Electronique	50	Nano Joule/bit
Amp	facteur d'Amplification	100	pJ/bit/m <sup>2</sup>
P_size	Taille du Paquet	2000	Bits
Distance	Distance Euclidienne	$\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$	Mètre
T	Température d'un nœud	] 35, 40]	Degrée Celsius

**Tableau 3. 2 :** Capteurs biomédicaux utilisés dans le modèle de simulation

Biocapteur	Signification	Fonction
EEG	ElectroencephaloGramme	Enregistre les signaux électroencéphalographiques du cerveau
ECG	ElectroCardioGramme	Enregistre le signal électrique produit par le cœur
TENS	Pression artérielle	Mesure la force que le sang exerce contre les parois des vaisseaux sanguins
EMG	ElectroMyoGramme	Enregistre les signaux électromyographie de différents muscles du corps
CM	Capteur de Mouvement	Détecte les mouvements du corps.
SINK	Le sink	La station de base
AK	Genou Artificiel	Genou artificiel
Glu	Glucose	Mesure la concentration de glucose dans le sang
OS	Oxygène Sanguin	Mesure le niveau du gaz dans le sang artériel
InjIn	Injecteur d'Insuline	Utilisé pour l'injection d'insuline
Pos	Positionnement	Utilisé pour le positionnement à distance des outils chirurgicaux et le positionnement du lit du patient
LA	Acide lactique	Utilisé pour la détection d'acide lactique

Nous supposons que le réseau WBAN est déployé dans une zone de 140 cm × 180 cm, composée d'un sink et de 11 nœuds capteurs (le Tableau 3. 2 montre les capteurs biomédicaux utilisés et leurs significations). La Figure 3. 6 illustre les positions fixes de

ces capteurs biomédicaux sur le corps et les liens entre eux. On suppose que tous les nœuds sont homogènes du point de vue température et énergie.

Pour la simulation de ce modèle sous Matlab, nous avons défini les nœuds comme des structures de données avec des paramètres :

- Les coordonnées x et y : qui définissent leur emplacement sur le corps par rapport à sa taille.
- La température T : la température du nœud.
- L'énergie E : l'énergie résiduelle du nœud.
- Voisins : la liste des voisins avec leurs informations respectives : nombre de sauts au sink, niveau d'énergie résiduelle, température et hotspot ou non.

Le Tableau 3. 1 résume les différents paramètres de simulation que nous avons utilisés pour la simulation du protocole HTTRP proposé.

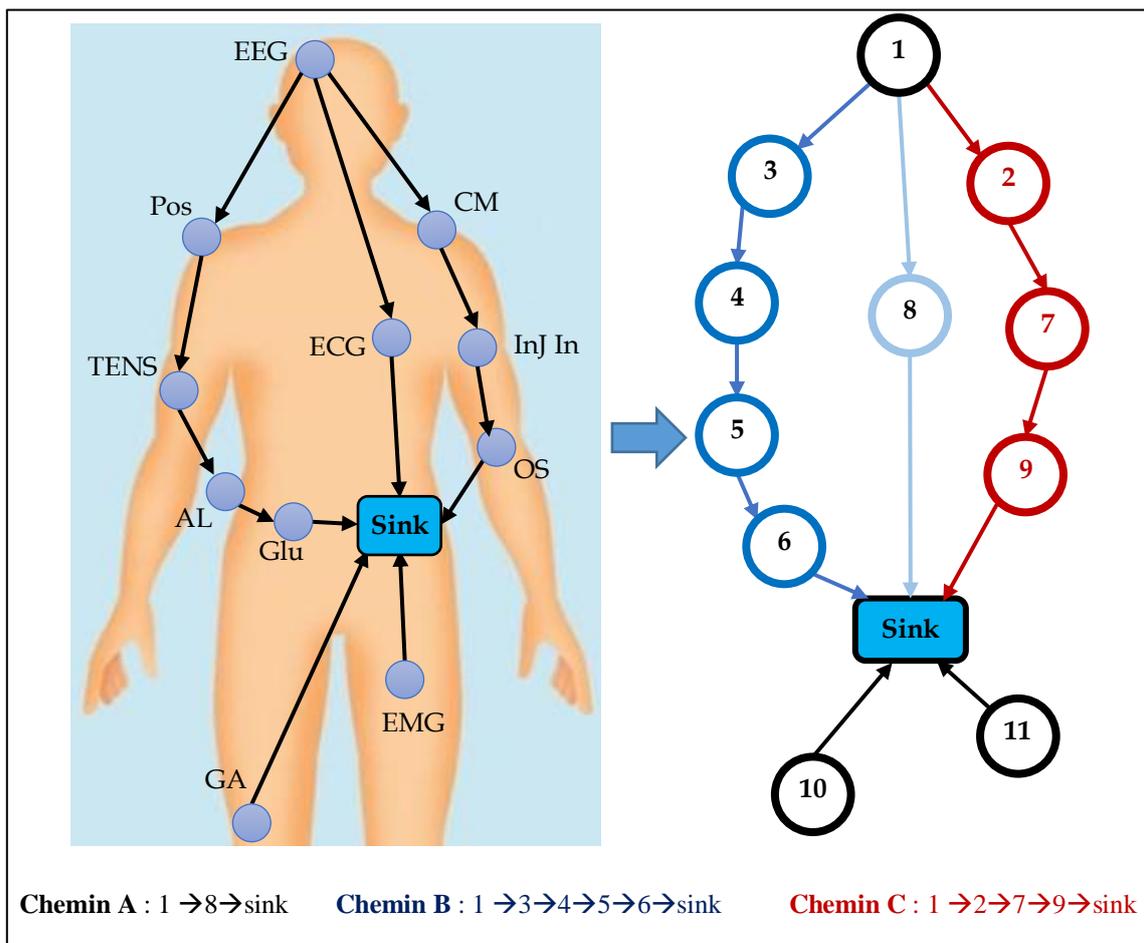


Figure 3. 6 : Modèle de simulation

### 3.4 RÉSULTATS DE SIMULATION

L'analyse des performances du protocole proposé est faite en se basant sur quatre métriques qui sont : durée de vie du réseau, équilibrage des charges, débit et nombre de hotspots générés.

#### 3.4.1 Durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau (appelée aussi network stabilité) est un facteur important qui doit être pris en compte lors de l'analyse des performances de tout protocole pour les WBANs et les réseaux de capteurs en général. Elle définit le temps moyen passé jusqu'à l'épuisement du premier nœud. La Figure 3. 7 montre une comparaison de la durée de vie du réseau entre notre protocole HTTRP et le protocole TARA [10].

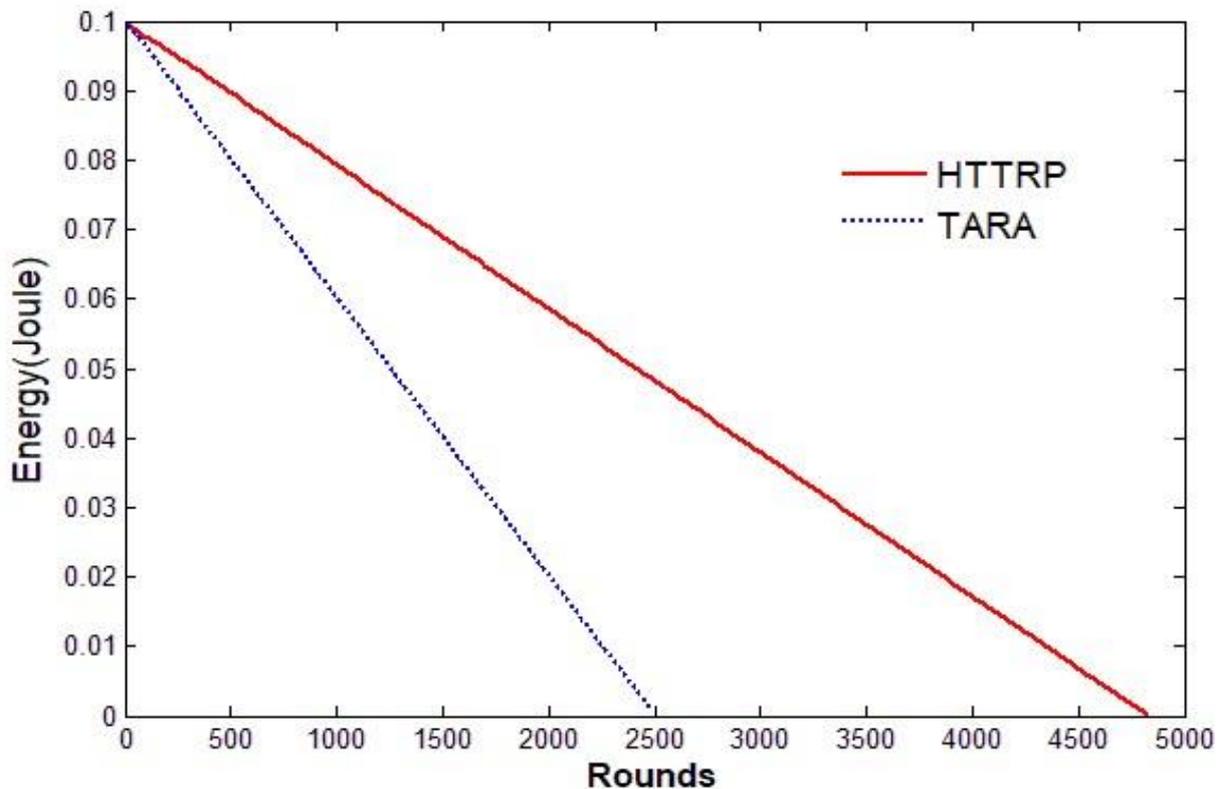


Figure 3. 7 : Durée de vide de réseau TARA vs HTTRP

Comme nous pouvons le voir sur le graphique, la durée de vie de notre protocole est plus performante que celle de TARA (presque le double). L'énergie résiduelle de TARA se détériore jusqu'à l'épuisement du premier capteur après 2479 tours alors que dans notre protocole HTTRP, l'épuisement du premier capteur arrive après 4836 tours. Cela

peut s'expliquer par le fait que TARA sélectionne toujours le chemin le plus court sans tenir compte de l'énergie résiduelle des nœuds, de plus, la stratégie de retrait (withdrawal) adoptée par TARA pour remédier au cas de détection de hotspot consomme inutilement plus d'énergie. Cependant, la longue durée de vie de HTTRP dans la simulation est due au fait que HTTRP utilise efficacement l'énergie des nœuds; premièrement, il sélectionne toujours le chemin avec l'énergie résiduelle maximale (c'est-à-dire le nœud le moins sollicité auparavant), deuxièmement, et contrairement à TARA, en cas de détection de hotspot, le nœud hotspot n'a pas besoin de renvoyer le paquet au nœud précédent ni d'envoyer de message d'accusé de réception, il économise donc son énergie résiduelle. Troisièmement, HTTRP utilise efficacement le message d'accusé de réception pour échanger la température et l'énergie résiduelle du nœud, de sorte qu'il n'a pas besoin de messages supplémentaires pour échanger ces informations.

### 3.4.2 Équilibrage des charges

L'un des principaux défauts de TARA (et de tous les algorithmes TARP basés sur l'algorithme SHR) est l'équilibrage de charge entre les différents nœuds du réseau. Dans cette classe de protocole de routage, les nœuds formant les plus courts chemins sont fortement sollicités, ce qui entraîne un déséquilibre de charge. On peut voir sur la

Figure 3. 8 que TARA utilise seulement deux chemins (A et B) à un pourcentage très différent et qu'il n'a pas utilisé du tout le troisième chemin C (Figure 3. 6).

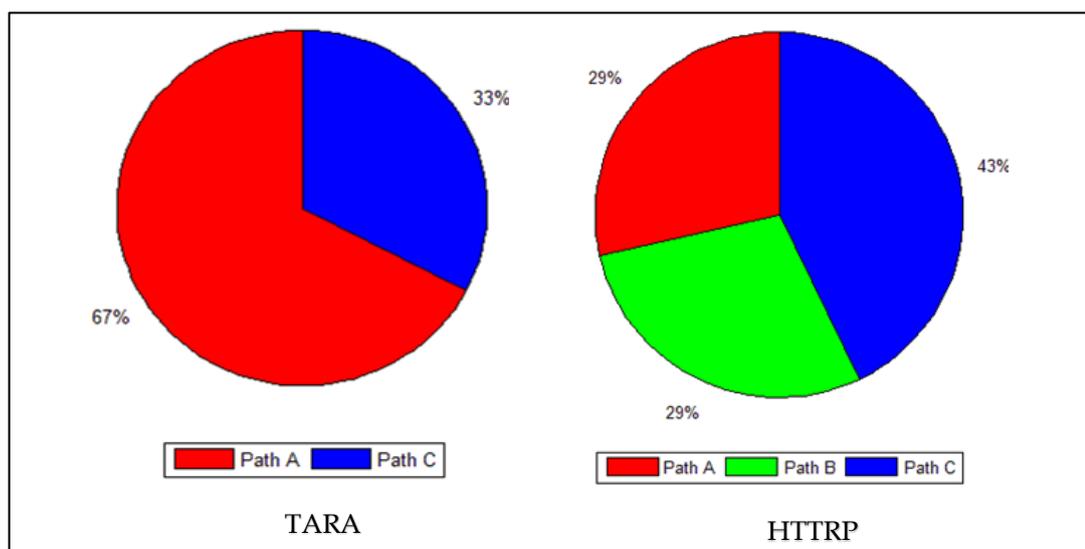


Figure 3. 8 : Pourcentage des paquets routés par les différents chemins

Dans la simulation, TARA commence en utilisant uniquement le plus court chemin (chemin A) pour les 50 premiers tours, lorsqu'il devient indisponible (génération du premier hotspot), il commence à utiliser le deuxième plus court chemin (chemin B), il réutilise le chemin A dès qu'il est disponible et ainsi de suite (Figure 3. 9). Par conséquent, TARA provoque une charge déséquilibrée (consommation d'énergie et élévation de température) entre les nœuds du réseau. Ce problème est résolu dans notre protocole en diversifiant le chemin de routage tout en distribuant uniformément la charge (consommation d'énergie et élévation de température). HTTRP utilise tous les chemins disponibles avec des pourcentages très proches (

Figure 3. 8), l'équilibrage de charge de HTTRP dans la simulation est dû au mécanisme de choix du chemin de routage; il sélectionne toujours le chemin le plus froid avec une énergie résiduelle maximale, il utilise donc les trois chemins alternativement (Figure 3. 10).

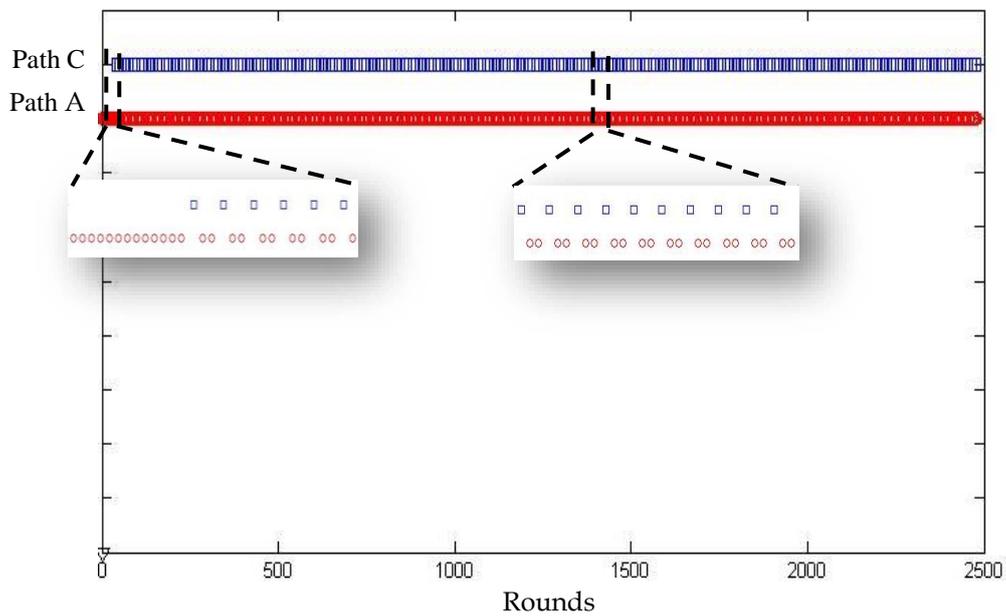
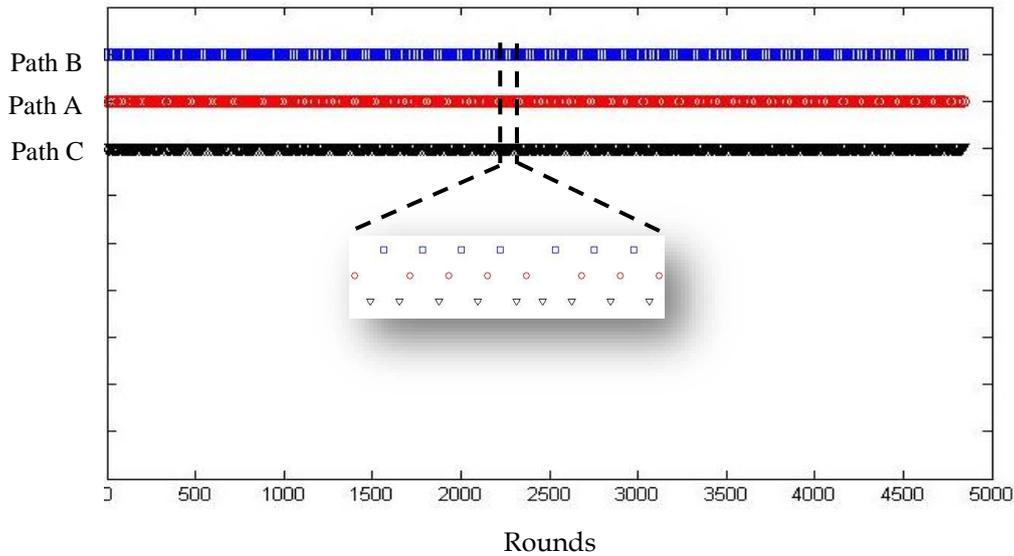


Figure 3. 9 : Diversification des chemins de TARA



**Figure 3. 10 :** Diversification des chemins de HTTRP

### 3.4.3 Débit

La Figure 3. 11 représente la comparaison du débit (paquets acheminés pendant la durée de vie du réseau) des protocoles HTTRP et TARA. On peut observer que le nombre total de paquets acheminés par HTTRP (1167 paquets) est très grand que celui de TARA (745) ; cela peut être compris, car la durée de vie du réseau avec HTTRP est plus longue que celle de TARA. Cependant, le nombre de paquets livrés par TARA au cours de sa durée de vie (2479 tours) est de 745 paquets qui sont plus grands que 598 paquets acheminés par HTTRP au cours de la même période. Cela parce que TARA utilise le plus court chemin, alors que notre protocole diversifie les chemins de routage, donc les paquets sont acheminés via des chemins plus longs et donc moins de paquets sont livrés au cours de la même période. Seulement, après cette durée, le débit du protocole HTTRP continue d'augmenter alors qu'il se stabilise dans le protocole TARA.

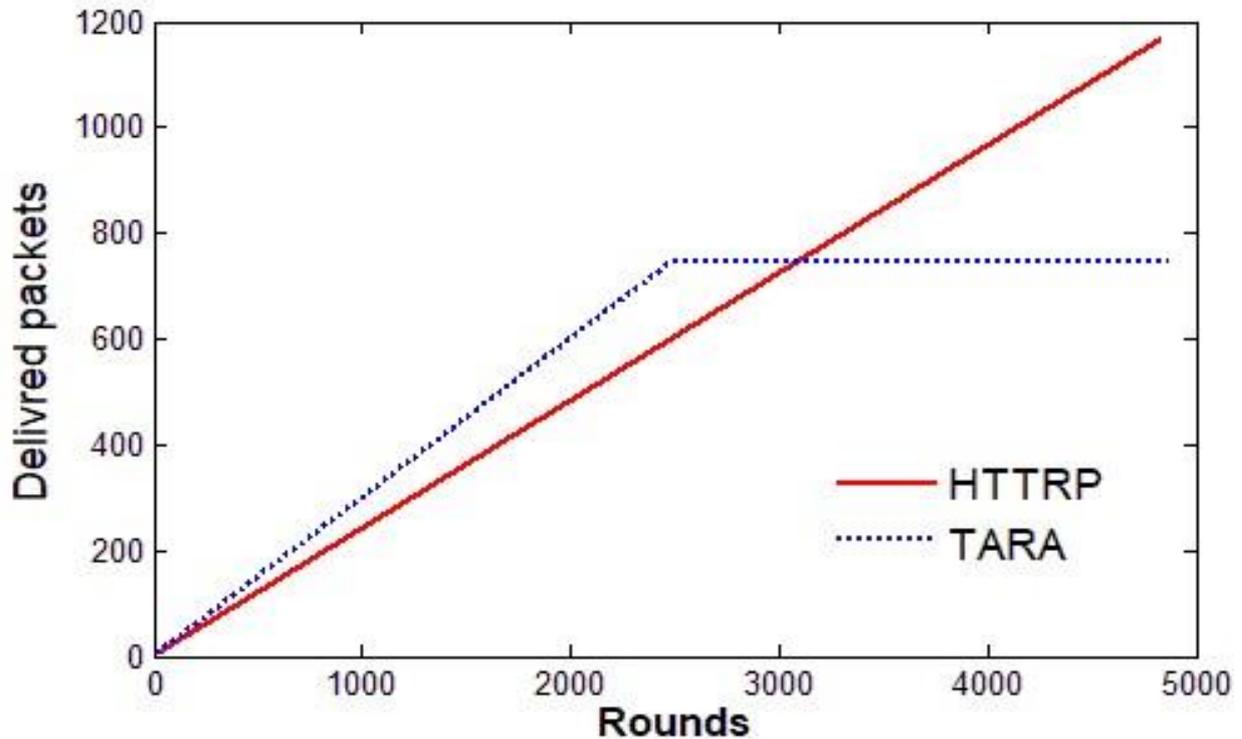


Figure 3. 11 : Débit de TARA vs HTTRP

#### 3.4.4 Nombre de hotspots

La Figure 3. 12 représente la comparaison des deux protocoles en termes du nombre de hotspots générés pendant la durée de vie du réseau. L'observation immédiate de cette figure est une énorme différence entre notre protocole HTTRP et le protocole TARA. TARA génère 244 hotspots au cours de sa vie; cependant, HTTRP ne génère aucun hotspot pendant sa durée de vie qui est près du double de la durée de vie de TARA. Cela peut s'expliquer par le fait que TARA choisit toujours le même chemin jusqu'à ce qu'il devienne un hotspot, puis sélectionne un autre chemin. Dès que la température du nœud hotspot descend en dessous du seuil, il le réutilise immédiatement, ce qui ne permet pas au nœud de bien se refroidir, donc il redevient un hotspot très rapidement. Dans la simulation, le zéro hotspot pour HTTRP est dû au fait que HTTRP change constamment le chemin de routage, ce qui donne aux nœuds suffisamment de temps pour se refroidir.

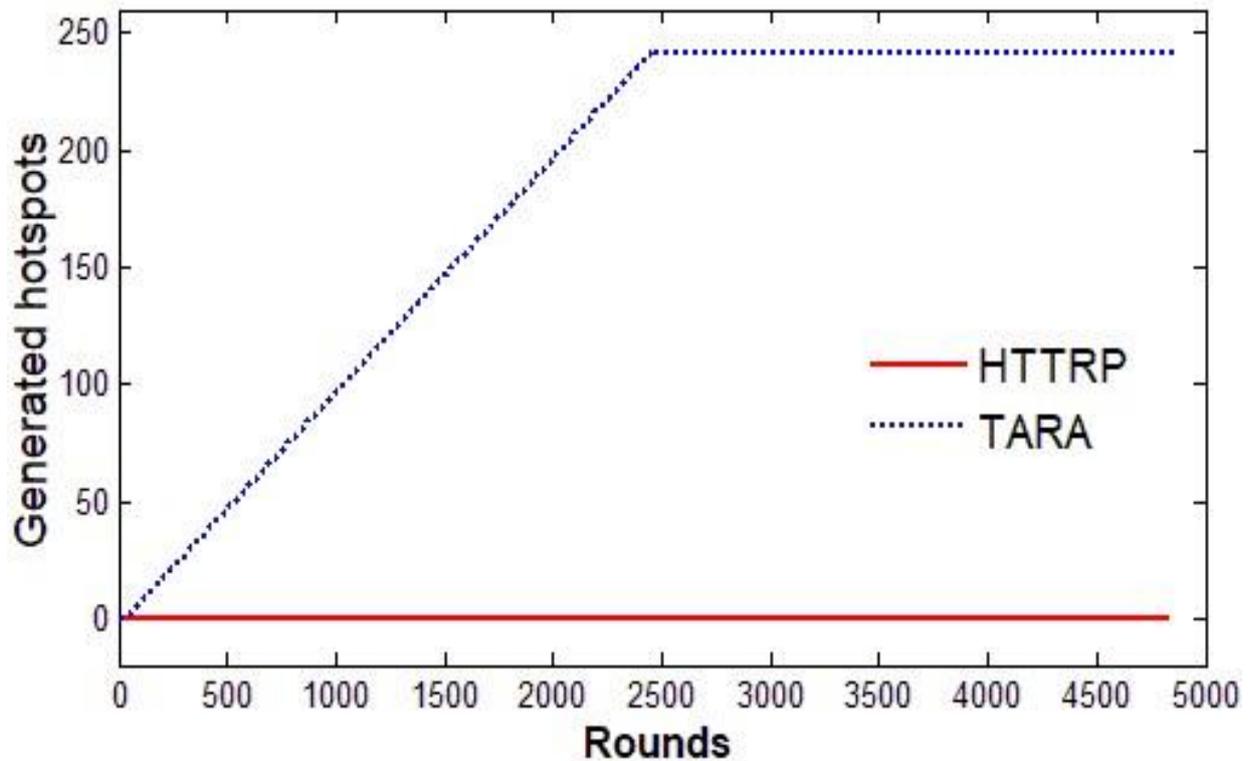


Figure 3. 12 : Hotspots générés pendant la durée de vie du réseau

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un nouveau protocole de routage à base de température (HTTRP) pour les WBANs est présenté visant à prolonger la durée de vie des WBANs. Nous avons décrit son implémentation, les étapes suivies lors de la simulation et nous avons discuté les résultats de simulation obtenus. Ces résultats de simulation ont montré que HTTRP permet de prolonger la durée de vie des biocapteurs en équilibrant leurs consommations d'énergie. Il augmente aussi le pourcentage des paquets acheminés tout en évitant la création des hotspots, tout cela est obtenu par son mécanisme de sélection des chemins de routage basé sur la température et l'énergie résiduelle des nœuds.

## Conclusion générale

Dans ces dernières années, notre vie dépend fortement de la technologie. Avec l'avancé technologiques et le développement des composants électroniques de petite taille et à faible coût. Les êtres humains s'offrent désormais d'une plateforme parfaite pour surveiller leurs paramètres physiologiques automatiquement et électroniquement à l'aide des WBANs.

Dans cette thèse, nous avons introduit les WBANs tout en étudiant leurs différentes caractéristiques, leur architecture, leurs domaines d'application, leurs topologies et les technologies de communication qu'ils utilisent. Nous avons ensuite abordé le routage dans ce type de réseaux en citant les challenges des protocoles de routages pour les WBANs, puis nous avons donné les différentes classes de ces protocoles tout en citant les caractéristiques des protocoles les plus connus de chaque classe. Nous avons accordé plus d'attention aux protocoles à base de température en donnant des descriptions détaillées de chaque protocole de cette classe en focalisant sur les protocoles les plus connues et les plus récents proposés dans la littérature. Après cette étude, nous avons identifié quelques lacunes des protocoles de routage à base de température notamment le problème de durée de vie de réseau WBAN causé par la négligence de l'énergie des capteurs lors de la sélection des chemins de routage. Nous avons proposé HTTRP [89], un nouveau protocole de routage pour les WBANs. HTTRP est un protocole de routage à base de température qui tient compte de l'énergie résiduelle des capteurs lors de la sélection du prochain capteur relais. Il vise à réduire la surchauffe des nœuds capteurs qui peuvent endommager les tissus humains et à prolonger la durée de vie du réseau par une gestion adéquate de l'énergie des capteurs. Les résultats de simulation faite ont montré les performances du protocole HTTRP qui ont permet de prolonger la durée de vie des biocapteurs en équilibrant leurs consommations d'énergie. Il augmente aussi le pourcentage des paquets acheminés tout en évitant la création des hotspots, tout cela est obtenu par son mécanisme de sélection des chemins de routage basé sur la température et l'énergie résiduelle des nœuds.

Comme perspectives, il y a lieu d'améliorer notre protocole HTTRP, en le rendant sensible à la mobilité. Cette mobilité est causée par les mouvements posturaux du corps humain qui causent un changement topologique dans le réseau WBAN.

## Bibliographie

- [1] J. H. Kurunathan, "Study and overview on WBAN under IEEE 802.15. 6," *U. Porto Journal of Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 11-21, 2015. doi: [https://doi.org/10.24840/2183-6493\\_001.001\\_0003](https://doi.org/10.24840/2183-6493_001.001_0003)
- [2] F. T. Zuhra, K. A. Bakar, A. Ahmed, and M. A. Tunio, "Routing protocols in wireless body sensor networks: A comprehensive survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 99, pp. 73-97, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2017.10.002>
- [3] K. Hasan, K. Biswas, K. Ahmed, N. S. Nafi, and M. S. Islam, "A comprehensive review of wireless body area network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 143, pp. 178-198, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.016>.
- [4] T. Rutherford and A. Socio, "Population ageing: statistics," *House of Commons library (Standard not. Retrieved Jan 2, 2013, from: www.parliament.uk/topics/PopulationArchive*, 2012.
- [5] W. H. Organization, "World report on ageing and health.," Geneva: WHO, 2015.
- [6] W. H. Organization. (30 mars 2020). *Cardiovascular diseases (CVDs)*. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- [7] W. H. Organization. (30 mars 2020). *diabetes*. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>
- [8] J. I. Bangash, A. H. Abdullah, M. H. Anisi, and A. W. Khan, "A survey of routing protocols in wireless body sensor networks," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 1322-1357, 2014.
- [9] Y. Qu, G. Zheng, H. Ma, X. Wang, B. Ji, and H. Wu, "A survey of routing protocols in WBAN for healthcare applications," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1638, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s19071638>
- [10] Q. Tang, N. Tummala, S. K. Gupta, and L. Schwiebert, "TARA: thermal-aware routing algorithm for implanted sensor networks," in *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, 2005, pp. 206-217: Springer. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/11502593\\_17](http://dx.doi.org/10.1007/11502593_17)
- [11] A. Bag and M. A. Bassiouni, "Hotspot preventing routing algorithm for delay-sensitive applications of in vivo biomedical sensor networks," *Information Fusion*, vol. 9, no. 3, pp. 389-398, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.inffus.2007.02.001>
- [12] R. A. Khan and A.-S. K. Pathan, "The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 14, no. 4, p. 1550147718768994, 2018. doi: <https://doi.org/10.1177/1550147718768994>
- [13] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, "A survey on wireless body area networks," *Wireless networks*, vol. 17, no. 1, pp. 1-18, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>
- [14] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks," *IEEE Std 802.15.6-2012*, pp. 1-271, 2012. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6161600
- [15] E. Jovanov *et al.*, "A WBAN system for ambulatory monitoring of physical activity and health status: applications and challenges," pp. 3810-3813: IEEE. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2005.1615290>
- [16] H.-B. Li and R. Kohno, "Body area network and its standardization at IEEE 802.15. BAN," in *Advances in mobile and wireless communications*: Springer, 2008, pp. 223-238.
- [17] C. A. Grimes, D. Kouzoudis, K. G. Ong, and R. Crump, "Thin-film magnetoelastic microsensors for remote query biomedical monitoring," *Biomedical Microdevices*, vol. 2, no. 1, pp. 51-60, 1999.
- [18] B. Ziaie and K. Najafi, "An implantable microsystem for tonometric blood pressure measurement," *Biomedical Microdevices*, vol. 3, no. 4, pp. 285-292, 2001.
- [19] M. K. Khurana, C. P. Winlove, and D. O'Hare, "Detection mechanism of metallized carbon epoxy oxidase enzyme based sensors," *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, vol. 15, no. 12, pp. 1023-1030, 2003.
- [20] K. Lorincz *et al.*, "Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities," *IEEE pervasive Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 16-23, 2004.

- [21] B. P. L. Lo, S. Thiemjarus, R. King, and G.-Z. Yang, "Body sensor network—a wireless sensor platform for pervasive healthcare monitoring," ed: na, 2005.
- [22] A. Wood *et al.*, "ALARM-NET: Wireless sensor networks for assisted-living and residential monitoring," *University of Virginia Computer Science Department Technical Report*, vol. 2, p. 17, 2006.
- [23] L. M. Borges *et al.*, "Overview of progress in Smart-Clothing project for health monitoring and sport applications," pp. 1-6: IEEE
- [24] S.-Y. Lee, J.-H. Hong, C.-H. Hsieh, M.-C. Liang, S.-Y. C. Chien, and K.-H. Lin, "Low-power wireless ECG acquisition and classification system for body sensor networks," *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 236-246, 2014.
- [25] G. Roessler *et al.*, "Implantation and explantation of a wireless epiretinal retina implant device: observations during the EPIRET3 prospective clinical trial," *Investigative ophthalmology & visual science*, vol. 50, no. 6, pp. 3003-3008, 2009.
- [26] S. Vutinuntakasame, V. r. Jaijongrak, and S. Thiemjarus, "An assistive body sensor network glove for speech-and hearing-impaired disabilities," pp. 7-12: IEEE
- [27] R. Burchfield and S. Venkatesan, "A framework for golf training using low-cost inertial sensors," pp. 267-272: IEEE
- [28] F. Benito-Lopez, S. Coyle, R. Byrne, C. O'Toole, C. Barry, and D. Diamond, "Simple barcode system based on inonogels for real time pH-sweat monitoring," pp. 291-296: IEEE
- [29] J. Lloret, M. Garcia, A. Catala, and J. J. P. C. Rodrigues, "A group-based wireless body sensors network using energy harvesting for soccer team monitoring," *IJNet*, vol. 21, no. 4, pp. 208-225, 2016.
- [30] T. Tamura, T. Yoshimura, M. Sekine, M. Uchida, and O. Tanaka, "A wearable airbag to prevent fall injuries," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13, no. 6, pp. 910-914, 2009.
- [31] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [32] Q. Gao *et al.*, "Highly stretchable sensors for wearable biomedical applications," *Journal of materials science*, vol. 54, no. 7, pp. 5187-5223, 2019.
- [33] H. Cao, V. Leung, C. Chow, and H. Chan, "Enabling technologies for wireless body area networks: A survey and outlook," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 12, pp. 84-93, 2009.
- [34] M. A. Hanson *et al.*, "Body area sensor networks: Challenges and opportunities," *Computer*, vol. 42, no. 1, pp. 58-65, 2009.
- [35] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao, and V. C. M. Leung, "Body area networks: A survey," *Mobile networks and applications*, vol. 16, no. 2, pp. 171-193, 2011.
- [36] C. Abreu, F. Miranda, and P. M. Mendes, "Quality of Service and Radio Management in Biomedical Wireless Sensor Networks," in *Handbook of Research on Computational Simulation and Modeling in Engineering*: IGI Global, 2016, pp. 704-725.
- [37] M. O. Farooq and T. Kunz, "Operating systems for wireless sensor networks: A survey," *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 5900-5930, 2011.
- [38] R. Zhang and J. Yu, *Energy-Efficient Algorithms and Protocols for Wireless Body Sensor Networks*. Springer International Publishing, 2019.
- [39] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless body area networks: A survey," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658-1686, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2013.121313.00064>
- [40] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks Corrigendum 1," *IEEE Std 802.15.4-2015/Cor 1-2018 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2015 as amended by IEEE Std 802.15.4n-2016, IEEE Std 802.15.4q-2016, IEEE Std 802.15.4u-2016, IEEE Std 802.15.4t-2017 and IEEE Std 802.15.4v-2017)*, pp. 1-14, 2018. doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8410916
- [41] J.-i. Naganawa, K. Wangchuk, M. Kim, T. Aoyagi, and J.-i. Takada, "Simulation-based scenario-specific channel modeling for wban cooperative transmission schemes," *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 559-570, 2014.

- [42] R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti, and R. Verdone, "A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1635-1657, 2014.
- [43] S. M. Demir, F. Al-Turjman, and A. Muhtaroglu, "Energy scavenging methods for WBAN applications: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 16, pp. 6477-6488, 2018.
- [44] G. Ahmed *et al.*, "Rigorous analysis and evaluation of specific absorption rate (SAR) for mobile multimedia healthcare," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29602-29610, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839909>
- [45] P. Code and C. Prix, "Medical electrical equipment—Part 2-33: Particular requirements for the safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis Appareils électromédicaux—Partie 2-33: Règles particulières de sécurité relatives aux appareils à résonance," 2002.
- [46] B. Braem, B. Latre, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, "The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks," pp. 1-8: IEEE
- [47] D. Djenouri and I. Balasingham, "New QoS and geographical routing in wireless biomedical sensor networks," pp. 1-8: IEEE
- [48] M. K. Nazir, R. U. Rehman, and A. Nazir, "A novel review on security and routing protocols in MANET," *Communications and Network*, vol. 8, no. 4, pp. 205-218, 2016.
- [49] M. Li, W. Lou, and K. Ren, "Data security and privacy in wireless body area networks," *IEEE Wireless communications*, vol. 17, no. 1, pp. 51-58, 2010.
- [50] 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 Computing Surveys (CSUR)*, vol. 50, no. 1, pp. 1-38, 2017.
- [51] B. J. Culpepper, L. Dung, and M. Moh, "Design and analysis of hybrid indirect transmissions (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, no. 1, pp. 61-83, 2004.
- [52] 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*, 2000, p. 10 pp. vol. 2: IEEE. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982>
- [53] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, vol. 13, no. 9, pp. 924-935, 2002.
- [54] T. Watteyne, I. Augé-Blum, M. Dohler, and D. Barthel, "Anybody: a self-organization protocol for body area networks," pp. 1-7
- [55] T. A. Alghamdi, "Research Article Cluster Based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Networks," 2016.
- [56] Z. Ullah, I. Ahmed, K. Razzaq, M. K. Naseer, and N. Ahmed, "DSCB: Dual sink approach using clustering in body area network," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 12, no. 2, pp. 357-370, 2019.
- [57] A. Tauqir, N. Javaid, S. Akram, A. Rao, and S. N. Mohammad, "Distance aware relaying energy-efficient: Dare to monitor patients in multi-hop body area sensor networks," pp. 206-213: IEEE
- [58] Q. Nadeem, N. Javaid, S. N. Mohammad, M. Y. Khan, S. Sarfraz, and M. Gull, "Simple: Stable increased-throughput multi-hop protocol for link efficiency in wireless body area networks," pp. 221-226: IEEE
- [59] B. Abidi, A. Jilbab, and E. H. Mohamed, "An energy efficiency routing protocol for wireless body area networks," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 42, no. 4, pp. 290-297, 2018.
- [60] L. D. P. Mendes and J. J. P. C. Rodrigues, "A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 2, pp. 523-534, 2011.
- [61] J. C. Correa-Chica, J. F. Botero-Vega, and N. Gaviria-Gómez, "Cross-layer designs for energy efficient wireless body area networks: a review," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 79, pp. 98-117, 2016.

- [62] V. Bhanumathi and C. P. Sangeetha, "A guide for the selection of routing protocols in WBAN for healthcare applications," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 7, no. 1, p. 24, 2017.
- [63] P. Demeester *et al.*, "A low-delay protocol for multihop wireless body area networks," pp. 1-8
- [64] A. G. Ruzzelli, R. Jurdak, G. M. P. O'Hare, and P. Van Der Stok, "Energy-efficient multi-hop medical sensor networking," pp. 37-42
- [65] A. Bag and M. A. Bassiouni, "Biocomm—A cross-layer medium access control (MAC) and routing protocol co-design for biomedical sensor networks," *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 85-103, 2009.
- [66] F. Hu, L. Wang, S. Wang, X. Liu, and G. He, "A human body posture recognition algorithm based on BP neural network for wireless body area networks," *China Communications*, vol. 13, no. 8, pp. 198-208, 2016.
- [67] M. Quwaider and S. Biswas, "On-body packet routing algorithms for body sensor networks," pp. 171-177: IEEE
- [68] M. Quwaider and S. Biswas, "Probabilistic routing in on-body sensor networks with postural disconnections," pp. 149-158
- [69] M. Quwaider and S. Biswas, "DTN routing in body sensor networks with dynamic postural partitioning," *Ad Hoc Networks*, vol. 8, no. 8, pp. 824-841, 2010.
- [70] A. Maskooki, C. B. Soh, E. Gunawan, and K. S. Low, "Opportunistic routing for body area network," pp. 237-241: IEEE
- [71] S. Movassaghi, M. Abolhasan, and J. Lipman, "Energy efficient thermal and power aware (ETPA) routing in body area networks," pp. 1108-1113: IEEE
- [72] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, "Probabilistic routing in intermittently connected networks," *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, vol. 7, no. 3, pp. 19-20, 2003.
- [73] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case," *IEEE/ACM transactions on networking*, vol. 16, no. 1, pp. 77-90, 2008.
- [74] M. Razzaque, C. S. Hong, and S. Lee, "Data-centric multiobjective QoS-aware routing protocol for body sensor networks," *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 917-937, 2011.
- [75] Z. Khan, S. Sivakumar, W. Phillips, and B. Robertson, "QPRD: QoS-aware peering routing protocol for delay sensitive data in hospital body area network communication," pp. 178-185: IEEE
- [76] 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 Computer Science*, vol. 19, pp. 171-179, 2013.
- [77] S. Ahmed, N. Javaid, M. Akbar, A. Iqbal, Z. A. Khan, and U. Qasim, "LAEEBA: Link aware and energy efficient scheme for body area networks," pp. 435-440: IEEE
- [78] N. Javaid, A. Ahmad, Y. Khan, Z. A. Khan, and T. A. Alghamdi, "A relay based routing protocol for wireless in-body sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 80, no. 3, pp. 1063-1078, 2015.
- [79] V. Ayatollahitafti, M. A. Ngadi, J. bin 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, 2016.
- [80] N. Yessad, M. Omar, A. Tari, and A. Bouabdallah, "QoS-based routing in Wireless Body Area Networks: A survey and taxonomy," *Computing*, vol. 100, no. 3, pp. 245-275, 2018.
- [81] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, "SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks," pp. 46-55: IEEE
- [82] E. Felemban, C.-G. Lee, and E. Ekici, "MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and. Timeliness in wireless sensor networks," *IEEE transactions on mobile computing*, vol. 5, no. 6, pp. 738-754, 2006.
- [83] T. L. Lim and G. Mohan, "Energy aware geographical routing and topology control to improve network lifetime in wireless sensor networks," pp. 771-773: IEEE

- [84] M. A. Razzaque, M. M. Alam, M. Mamun-Or-Rashid, and C. S. Hong, "Multi-constrained QoS geographic routing for heterogeneous traffic in sensor networks," *IEICE Transactions on communications*, vol. 91, no. 8, pp. 2589-2601, 2008.
- [85] 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 Computer Science*, vol. 19, pp. 224-231, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.033>
- [86] G. D. Ntouni, A. S. Lioumpas, and K. S. Nikita, "Reliable and energy-efficient communications for wireless biomedical implant systems," *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. 18, no. 6, pp. 1848-1856, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JBHI.2014.2300151>
- [87] A. Bag and M. A. Bassiouni, "Energy efficient thermal aware routing algorithms for embedded biomedical sensor networks," in *2006 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, 2006, pp. 604-609: IEEE. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MOBHOC.2006.278619>
- [88] D. Takahashi, Y. Xiao, F. Hu, J. Chen, and Y. Sun, "Temperature-aware routing for telemedicine applications in embedded biomedical sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2008, no. 1, p. 572636, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2008/572636>
- [89] S. Bouldjadj and Z. Aliouat, "High Throughput and Thermal Aware Routing Protocol (HTTRP) for Wireless Body Area Networks," *Ingénierie des Systèmes d'Information 2020*. doi: <https://doi.org/10.18280/isi.250106>
- [90] A. Bag and M. A. Bassiouni, "Routing algorithm for network of homogeneous and id-less biomedical sensor nodes (RAIN)," in *2008 IEEE Sensors Applications Symposium*, 2008, pp. 68-73: IEEE. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SAS13374.2008.4472946>
- [91] C. H. W. Oey and S. Moh, "A survey on temperature-aware routing protocols in wireless body sensor networks," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 9860-9877, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s130809860>
- [92] F. Ahourai, M. Tabandeh, M. Jahed, and S. Moradi, "A thermal-aware shortest hop routing algorithm for in vivo biomedical sensor networks," in *2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations*, 2009, pp. 1612-1613: IEEE. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ITNG.2009.274>
- [93] M. M. Monowar, M. Mehedi Hassan, F. Bajaber, M. A. Hamid, and A. Alamri, "Thermal-aware multiconstrained intrabody QoS routing for wireless body area networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, no. 3, p. 676312, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>
- [94] B.-S. Kim, S. Kang, J. Lim, K. H. Kim, and K.-I. Kim, "A mobility-based temperature-aware routing protocol for wireless body sensor networks," pp. 63-66: IEEE
- [95] L. Z. Maymand, V. Ayatollahitafti, and A. Gandomi, "Traffic control thermal-aware routing in body area networks," *Journal of Soft Computing and Decision Support Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 17-22, 2017.
- [96] M. M. Monowar and F. Bajaber, "On designing thermal-aware localized QoS routing protocol for in-vivo sensor nodes in wireless body area networks," *Sensors*, vol. 15, no. 6, pp. 14016-14044, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s150614016>
- [97] A. R. Bhangwar, P. Kumar, A. Ahmed, and M. I. J. W. P. C. Channa, "Trust and thermal aware routing protocol (TTRP) for wireless body area networks," vol. 97, no. 1, pp. 349-364, 2017.
- [98] S. Jain and A. Singh, "Temperature-aware routing using secondary sink in wireless body area sensor network," *International Journal of E-Health and Medical Communications (IJEHMC)*, vol. 9, no. 2, pp. 38-58, 2018.
- [99] J. Li and P. Mohapatra, "An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks," vol. 62, p. 2721: Citeseer
- [100] F. Jamil, M. Iqbal, R. Amin, and D. J. E. Kim, "Adaptive Thermal-Aware Routing Protocol for Wireless Body Area Network," vol. 8, no. 1, p. 47, 2019.
- [101] K. S. Kathe and U. A. Deshpande, "A Thermal Aware Routing Algorithm for a wireless body area network," *Wireless Personal Communications*, vol. 105, no. 4, pp. 1353-1380, 2019.

- [102] M. Javed, G. Ahmed, D. Mahmood, M. Raza, K. Ali, and M. Ur-Rehman, "TAE0-A thermal aware & energy optimized routing protocol for wireless body area networks," *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3275, 2019.
- [103] S. Ullah *et al.*, "A comprehensive survey of wireless body area networks," *Journal of medical systems*, vol. 36, no. 3, pp. 1065-1094, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-010-9571-3>
- [104] G. Ahmed, D. Mahmood, and S. Islam, "Thermal and energy aware routing in wireless body area networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 15, no. 6, p. 1550147719854974, 2019. doi: <https://doi.org/10.1177/1550147719854974>