

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunication

Spécialité : Réseaux de télécommunication

Par :

MEHADJI NASRINE

Sujet

**ETUDE DES PROTOCOLES DE COMMUNICATION POUR LES
RESEAUX DE CAPTEUR SANS FIL BASE SUR LES LIENS
RADIO COOPERATIFS INTER/INTRA WBANS**

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

Mme. BENMANSOUR F.

MCB

Univ. Tlemcen

Présidente

Mr. HADJILA M.

MCB

Univ. Tlemcen

Examineur

Mme. BENLALDJ L.

MAA

Univ. Tlemcen

Encadrante

Remerciements

Je tiens à remercier dieu le tout puissant qui m'a donné durant toutes ces années d'études la santé, le courage, la confiance et la foi en moi même ce qui m'a permis de progresser et d'arriver jusqu'à ce jour.

Je ne saurais, réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite mon encadrante Madame BENLALDJ Lamia maître assistante à l'université Abou-Bekr Belkaid, pour sa grande patience, ses conseils et sa disponibilité. Sa compétence a rendu ce travail particulièrement intéressant.

Je la remercie également pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de cette année d'étude.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui me feront l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir cette modeste contribution.

Je remercie cordialement, Madame BENMANSOUR Fatema Zohra maître de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de présider ce jury de mémoire.

Je remercie également Monsieur HADJILA Mourad maître de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de participer à ce mémoire en qualité d'examineur.

Je profiterais aussi de ce mémoire pour exprimer mes plus vifs remerciements envers tous les professeurs de la faculté de technologie de Tlemcen qui m'ont apporté du soutien durant mes études.

Que ce travail soit pour le gage de ma profonde estime à tous mes amis et tous ceux qui m'ont aidé.

Comme je n'oublie pas de remercier aussi Monsieur MECHERNE A et Madame BOUGAROUCHE R pour tous leurs aides infinies, ses encouragements, ses orientations et ses conseils.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Mehadji Nasrine

Dédicaces

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,
L'amour, le respect, la reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que
Je dédie ce travail à :*

♥ *Mes très chers parents : Abdelmadjid et Saliha*

Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

♥ *Mes chers et adorable frères et sœurs : Zakaria, Meriem, Ali et Lamia*

Qui ont su me comprendre, m'épauler et m'encourager dans les moments les plus difficiles. Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

♥ *A La mémoire de mes grands-pères et ma grande mère Fatima B*

*J'aurais tant aimé que vous soyez présents.
Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.*

♥ *A La mémoire de ma tante Malika B*

Que vous reposiez dans le paradis du seigneur.

♥ *Tous les membres de ma grande famille : Khadidja B, mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses à mes chères cousins et cousines.*

♥ *Wafaa R et Mes amis de toujours*

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

*A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près.
A tous les étudiants de ma promotion de Master.*

Mehadji Nasrine

Résumé

Les récents progrès technologiques en matière de communication sans fil, de circuits intégrés et de systèmes micro-électromécaniques ont permis la mise en place de nœuds capteurs miniaturisés, intelligents, de faible puissance, et nanocapteurs placés dans ou sur le corps humain pour la surveillance des fonctions du corps et de son environnement immédiat, donnant naissance à des réseaux appelés réseaux corporels sans fil ou Wireless Body Area Network (WBAN).

Les WBAN font faces à de nombreuses exigences en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau, qui doivent être prises en considération dans la conception de différents protocoles de communication qui jouent à leur tour un rôle important dans la performance générale du système.

Nous nous intéressons dans le cadre de ce projet à la présentation de l'architecture WBAN, les défis et différents aspects du WBAN ainsi que les protocoles de communication à courte portée existants dans les WBAN. Nous décrivons également les limites sur le plan architectural des plateformes de communication WBAN existantes.

Notre étude aura pour objectif d'étudier, les exigences d'implémentation basées sur la norme IEEE 802.15.6 dont les spécifications des couches MAC et PHY ainsi qu'un aperçu sur les protocoles de routage destinés spécialement pour les WBAN. Enfin, l'intégration de la technologie Software Defined Networking (SDN), la récolte d'énergie (EH) et la technologie Blockchain dans WBAN sont également fournies en tant que source de motivation pour le futur développement de la recherche.

Mots clés : Réseau WBAN, protocoles de communication à courte portée, MAC, PHY, SDN, EH, Blockchain.

Abstract

Recent technological advances in wireless communication, integrated circuits and micro-electromechanical systems have enabled the implementation of miniaturized, intelligent, low-power sensor nodes and nanosensors placed in or on the human body for monitoring functions of the body and its immediate environment, giving rise to networks called Wireless Body Area Network (WBAN).

WBANs face many requirements in terms of power consumption and network lifetime, which must be taken into consideration in the design of different communication protocols, which in turn play an important role in the overall performance of the network system.

In this project, we are interested in the presentation of the WBAN architecture, the challenges and different aspects of WBAN as well as the existing short-range communication protocols in WBANs. We also describe the architectural limitations of existing WBAN communication platforms.

The objective of our study will be to study the implementation requirements based on the IEEE 802.15.6 standards including the specifications of the MAC and PHY layers as well as an overview of the routing protocols intended especially for WBANs. Finally, the integration of Software Defined Networking (SDN) technology, energy harvesting (EH) and Blockchain technology in WBAN are also provided as a source of motivation for future research development.

ملخص

مكنت التطورات التكنولوجية الحديثة في الاتصالات اللاسلكية والانظمة المدمجة والأنظمة الكهروميكانيكية من استخدام اجهزة مصغرة وذكية، منخفضة الطاقة وأجهزة استشعار بالنانو سنتيمتر موضوعة في أو على جسم الإنسان لمراقبة وظائف الجسم وبيئته المباشرة، مما أدى إلى ظهور شبكات تسمى شبكات الجسم اللاسلكية.(WBAN)

تواجه شبكات WBAN العديد من المطالب فيما يتعلق باستهلاك الطاقة وعمر الشبكة، والتي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم بروتوكولات الاتصال المختلفة والتي دورها تلعب دورًا مهمًا في الأداء العام لنظام الشبكة.

في هذا المشروع، نحن مهتمون بتقديم بنية WBAN والتحديات والجوانب المختلفة لـ WBAN بالإضافة إلى بروتوكولات الاتصال قصيرة المدى الحالية في WBANs. وصفنا أيضًا القيود المتعلقة بتنظيم منصة الاتصالات WBAN الحالية.

تهدف دراستنا إلى دراسة متطلبات التنفيذ بناءً على معيار IEEE 802.15.6 بما في ذلك مواصفات طبقات MAC و PHY بالإضافة إلى نظرة عامة على بروتوكولات التوجيه المخصصة لشبكات WBAN. أخيرًا، يتم أيضًا توفير ادماج تقنية (SDN) وتجميع الطاقة (EH) وتقنية Blockchain في WBAN كمصدر لتحفيز البحث وتطويره في المستقبل.

Sommaire

REMERCIEMENTS	i
DEDICACES	ii
RÉSUMÉ	iii
SOMMAIRE	v
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABREVIATIONS	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESEAUX WBAN	4
I.1 - INTRODUCTION	5
I.2 - LES RESEAUX SANS FILS	5
I.2.1- TECHNIQUES DE TRANSMISSION DANS LES RESEAUX SANS FIL	6
I.2.2- CATEGORIES DES RESEAUX SANS FIL	6
I.2.3- ARCHITECTURE DES RESEAUX SANS FIL	7
I.3 - LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL	9
I.3.1- DEFINITION D'UN NŒUD CAPTEUR	9
I.3.2- COMPOSANTS D'UN NŒUD CAPTEUR	10
I.3.3 ARCHITECTURES DES RESEAUX DE CAPTEUR SANS FIL	11
I.3.4 - SYSTEMES D'EXPLOITATION POUR LES CAPTEURS	13
I.3.5 - DOMAINES D'APPLICATION DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL.....	14
I.4- LES RESEAUX CAPTEURS CORPORELS SANS FIL (WBAN)	16
I.4.1- DIFFERENCE ENTRE WBAN ET WSN	17
I.4.2- COMPOSANTS D'UN SYSTEME WBAN.....	18
I.4.3- CATEGORIES DES NŒUDS CAPTEUR WBAN	19
I.4.4- TOPOLOGIES DES RESEAUX WBAN	22
I.4.5- ARCHITECTURE DE COMMUNICATION DANS LES SYSTEMES WBAN.....	24
I.4.5.1- Communications de niveau 1 : autour du corps (intra BAN)	24
I.4.5.2- Communications de niveau 2 : entre corps (inter BAN)	25
I.4.5.3- Communications de niveau 3 : au-delà du corps (Beyond BAN).....	26
I.4.6- TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION WBAN.....	26
I.5- CONCLUSION	26
CHAPITRE II : Etude des protocoles et attributs dans les réseaux WBAN	28
II.1- INTRODUCTION	29
II.2- ARCHITECTURE RESEAU POUR LES WBAN	29

II.2.1- COUCHE PHYSIQUE PHY	29
II.2.2- COUCHE LIAISON DE DONNEES	32
II.2.3- COUCHE RESEAU.....	35
II.2.4- COUCHE TRANSPORT	37
II.2.5- COUCHE APPLICATION	39
II.3- LES ATTRIBUTS DES SYSTEMES WBAN	40
II.4- PROTOCOLES DE COMMUNICATION WBAN	42
II.4.1- LA NORME IEEE 802.15.1 / BLUETOOTH.....	43
II.4.2- LA NORME WIBREE (ULTRA LOW POWER BLUETOOTH).....	44
II.4.3- LA NORME IEEE 802.15.3 / UWB (ULTRA WIDE BAND)	44
II.4.4- LA NORME IEEE 802.15.4 / ZIGBEE.....	44
II.4.5- LA NORME IEEE 802.15.6.....	45
II.4.5.1- Spécifications de la couche PHY de l'IEEE 802.15.6.....	46
II.4.5.2- Spécifications de la couche MAC de l'IEEE 802.15.6	49
II.4.5.3- Exigences de la norme IEEE 802.15.6	51
II.5- MAC ET ROUTAGE DANS LES WBAN.....	52
II.5.1- MAC DANS LES WBAN.....	52
II.5.2- ROUTAGE DANS LES WBAN.....	54
II.5.2.1- Protocoles de routage basés sur les clusters	54
II.5.2.2- Protocoles de routage multicouches.....	55
II.5.2.3- Protocoles de routage basés sur les mouvements posturaux.....	55
II.5.2.4- Protocoles de routage compatibles aux qualités de service	55
II.5.2.5- Protocoles de routage tenant compte de la température	55
II.6- CONCLUSION	55
<i>CHAPITRE III : Challenges et future tendance des wban.....</i>	<i>57</i>
III.1- INTRODUCTION.....	58
III.2- LIMITATIONS DES ARCHITECTURES WBAN ACTUELLES	58
III.2.1- DEPENDANCE DES FABRICANTS	58
III.2.2- ARCHITECTURE DYNAMIQUE DU WBAN.....	59
III.2.3- NECESSITE D'ESPACE DE STOCKAGE.....	59
III.2.4- UTILISATION DES RESSOURCES	59
III.2.5- SECURITE DES DONNEES.....	59
III.3- CHALLENGES ET OPPORTUNITES DANS LES WBAN.....	59
III.3.1- DISPOSITIFS HETEROGENES ET TRAFIC.....	60
III.3.2- EFFICACITE ENERGETIQUE	61
III.3.3- DEFIS DE L'ENVIRONNEMENT	62
III.3.4- SECURITE, AUTHENTIFICATION ET CONFIDENTIALITE	63
III.3.5- BIO-COMPATIBILITE	63
III.3.6- QUALITE DE SERVICE (QOS)	64
III.3.7- CONCEPTION MATERIELLE	66
III.3.8- REGLES D'ENGAGEMENT	66
III.3.9- OVERHEATING.....	66
III.4- LES FUTURES TENDANCES	67
III.4.1- WBAN BASE SUR LE SDN.....	68
III.4.1.1- Implémentation et évaluation	69

<i>III.4.1.2- Communications inter et intra-plan</i>	70
<i>III.4.1.3- Standardisation</i>	70
<i>III.4.1.4- Système de contrôle distribué</i>	70
III.4.2- TECHNOLOGIE BLOCKCHAIN POUR LE WBAN	70
III.4.3- RECOLTE D'ENERGIE DANS LE WBAN	72
<i>III.4.3.1- Récolte d'énergie photovoltaïque (PVEH : PhotoVoltaic Energy Harvesting)</i>	72
<i>III.4.3.2- Récolte d'énergie piézoélectrique (PEH : Piezoelectric Energy Harvesting)</i>	72
<i>III.4.3.3- Récolte d'énergie thermoélectrique (TEH : Thermoelectric Energy Harvesting)</i>	73
<i>III.4.3.4- Récolte d'énergie RF (RFEH : RF Energy Harvesting)</i>	73
III.5- CONCLUSION	74
CONCLUSION GENERALE	76
BIBLIOGRAPHIE	78

Liste des figures

- Figure I.1** : Catégories de réseaux sans fil
- Figure I.2** : Mode avec infrastructure
- Figure I.3** : Mode sans infrastructure
- Figure I.4** : Architecture d'un réseau de capteurs sans fil
- Figure I.5** : Anatomie d'un nœud capteur
- Figure I.6** : Architecture plate des réseaux de capteurs sans fil
- Figure I.7** : Réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques
- Figure I.8** : Communication single hop
- Figure I.9** : Communication multi hop
- Figure I.10** : Réseau de capteurs corporels sans fils
- Figure I.11** : Topologies dans les réseaux WBAN
- Figure I.12** : Architecture générale des communications dans un système BAN
- Figure II.1** : Défis de la couche physique
- Figure II.2** : Défis de la couche MAC
- Figure II.3** : Défis de la couche réseau
- Figure II.4** : Défis de la couche de transport du WBAN

Liste des Tableaux

- Tableau I-1** Différences entre WBAN et WSN

Liste Des Abréviations

ADC	Convertisseur Analogique-Numérique
API	Application Programming Interface
BAN	Body Area Networks
BCU	Body Control Unit
BER	Bit Error Rate
BLE	Bluetooth Low Energy
BlochIE	Blockchain-based platform for Healthcare Information Exchange
BPL	Body Path-Loss
CAP	Contention Access Phase
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention Free Phase
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
D8PSK	Differential 8-Phase Shift Keying
DBPSK	Differential Binary Phase-shift Keying
DES	Dossier de Santé Electronique
DC	Direct Current
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
EAP	Exclusive Access Phases
ECG	Electrocardiographie
EEG	Electroencéphalographie
EFC	Electrostatic Field Communication
EH	Energy harvesting
EHR	Electronic health record
EMG	Electromyographie
FCC	La Commission Fédérale de Communication
GMSK	Gaussian minimum-shift keying

GP	Global Positioning System
GTS	Guaranteed time slots
HBC	Human Body Communication
IoT	Internet of Things
ISM	Industriel, scientifique and medical
LOS	Line of sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAN	Métropolitain Area Network
MANTIS	Multimodal NeTworks of In-situ micro Sensor
MAP	Managed Access Phases
MICS	Les services de Communication des Implants Médicaux
NB	Narrowband
NLOS	Non line of sight
PEH	Piezoelectric Energy Harvesting
PER	Packet Error Rate
PDA	Personal Digital Assistant
PHR	Physical Layer Header
PHY	Couche Physique
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PPDU	The Physical Layer Protocol Data Unit
PSDU	Physical Layer Service Data unit
PVEH	PhotoVoltaic Energy Harvesting
QoS	Quality of Service
RAP	Random Access Phases
RCSF	Réseaux capteur sans fil

RFEH	RF Energy Harvesting
RNF	Receive Noise Figure
SDN	Software-defined networking
SFD	Start Frame Delimiter
SHR	Synchronization Header
SMP	Sensor Management Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SQDDP	Sensor Query and Data Dissemination Protocol
TADAP	Task Assignment and Data Advertisement Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time-division multiple access
TEH	Thermoelectric Energy Harvesting
UDP	User Datagram Protocol
UWB	Ultra Wide Band
WBAN	Wireless_Body Area Networks
WG15	Working Group15
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Métropolitain Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks
WWAN	Wireless Wide Area Network
Xdsl	CrossDigital Subscriber L

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, la technologie de communications sans fil n'a cessé d'être développée et a été introduite à tous les niveaux de la société, nous pouvons citer : les entreprises, les gares, les hôpitaux, les usines, les domiciles, les téléphones, etc. Plusieurs domaines ont profité de cette technologie pour répondre à leurs besoins, tel que le domaine militaire, les applications environnementales, la santé ou encore la domotique. Ce progrès a entraîné conjointement avec celui de la micro-électronique l'apparition de nouveaux outils et objets communicants qui améliorent notre qualité de vie, *les capteurs*. Le capteur est devenu un véritable système embarqué qui a pour objectif principal la collecte et la transmission des données capturées.

La collaboration d'un grand nombre de ces capteurs, sans fil, avec une station de base donne naissance à un réseau de capteurs sans fil (RCSF), qui appliqué au domaine médical est dit réseau de capteurs corporels ou simplement *WBAN* (Wireless Body Area Network). Le réseau de capteur corporel est un réseau constitué de mini-capteurs portables ou implantés dans le corps humain. Chaque nœud capteur est généralement capable de détecter une ou plusieurs caractéristiques physiologiques du corps humain. Le nœud capteur stocke puis transmet les données mesurées par l'intermédiaire d'un réseau sans fil à un dispositif de traitement central connu sous le nom de serveur distant, où un traitement et une analyse de ces données a lieu. Les réseaux de télécommunication WLAN, WiMax, LTE, ou le satellite, etc. peuvent être utilisés comme moyen de communication entre passerelles.

Les systèmes WBAN étant principalement conçus pour la surveillance à distance des signes vitaux des patients, ces systèmes doivent avoir un haut degré de fiabilité et une faible latence afin que le personnel médical puisse prendre des décisions en temps voulu sur le traitement adapté. Avec des taux de transmission faibles pour les capteurs, il faut aussi un haut niveau d'efficacité énergétique pour permettre au système WBAN de fonctionner pendant une période de temps plus importante. De plus, les patients peuvent se déplacer librement, n'importe où, avec le sentiment que le système WBAN auquel ils sont rattachés effectuera les tâches nécessaires. Avant on parlait de « eHealth » où la surveillance médicale était basé sur des processus électronique, mais actuellement cette surveillance est devenue mobile donnant naissance au terme « mHealth ».

Les systèmes de surveillance à distance actuels sont confrontés à plusieurs problèmes. Par exemple, ils sont spécifiques à l'emplacement, c'est-à-dire qu'ils doivent être à la portée des points d'accès d'un réseau, soit filaires, ou sans fil. Par ailleurs, les technologies Bluetooth et Wi-Fi dans le cadre de la communication sans fil à courte portée ont été des normes populaires dans les systèmes de surveillance. Mais toutes deux consomment une quantité considérable d'énergie et provoquent également des interférences. D'autres protocoles de communications sans fil ont été développés et intégrés au réseau WBAN tels que, UWB ou l'IEEE 802.15.6, qui ont permis d'utiliser l'énergie des capteurs d'une manière efficace en se basant sur une conception et implémentation appropriée de leurs couches PHY et MAC.

En plus des problèmes cités auparavant, des défis supplémentaires sont liés aux systèmes WBAN tels que la sécurité, la confidentialité, la qualité de service, l'hétérogénéité ou encore la surchauffe des composants qui ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Cependant, toutes les études existantes se limitent à la discussion sur l'architecture de communication, les applications et quelques défis. Aucune de ces études ne discute les difficultés des architectures actuelles pour faire face aux complexités de gestion, sécurité, fiabilité, etc. ni sur l'amélioration de ces architectures.

Ce qui nous amène à discuter certaines technologies récentes développées et intégrées au WBAN, qui d'une part comblent les lacunes des résultats de la recherche actuelle et d'autre part relèvent les défis existants.

L'objectif de ce travail est de faire un état de l'art des études effectuées sur les technologies de communications WBAN assurant une bonne fiabilité et latence ainsi qu'une optimisation de la consommation d'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau, et d'étudier la possibilité d'intégration de nouvelles technologies informatiques sur les réseaux WBAN tout en discutant leurs performances d'implémentation et évaluation.

Pour cela le manuscrit est scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à une présentation des réseaux WSN en générale et des réseaux WBANs en particulier et une comparaison entre eux est effectuée. Nous allons par la suite exposer les principaux composants d'un système WBAN, les différents types de nœuds capteurs utilisés ainsi que les topologies rencontrées dans ces réseaux. Enfin, nous présentons l'architecture de communication utilisée dans les systèmes WBAN.

Le deuxième chapitre permet de présenter en premier lieu les différentes couches de l'architecture réseau des WBAN ainsi que les défis liés à chaque couche. Ensuite nous exposons les caractéristiques/attributs des systèmes WBAN. Enfin nous terminons avec une étude comparative des différents protocoles de communication Bluetooth, Zigbee, UWB ou encore IEEE 802.15.6 utilisés dans les réseaux WBAN et en particulier les spécifications de la couche PHY et MAC de ce dernier protocole, spécialement conçu pour la transmission de données en temps réel et dont les paramètres de fiabilité et latence dépendent conjointement de ces deux couches.

Le troisième chapitre est consacré à la discussion des limitations d'implémentation des architectures WBAN ainsi que les études effectuées pour relever les challenges lors de la conception de ces réseaux. Ce qui nous a permis de discuter les nouvelles technologies SDN, Blockchain et EH récemment introduites au réseau WBAN et les futurs travaux qui peuvent être poursuivis dans ce sens.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
LES RESEAUX WBAN

I.1 - Introduction

Le développement technologique au cours des dernières décennies a permis l'émergence d'une cohabitation parfaite entre l'informatique et l'électronique. Cette cohabitation a permis le développement de réseaux sans fil, mobiles et dotés de capteurs.

Aussi, les récents progrès dans le domaine des techniques de communication sans-fil (wireless) a permis l'apparition de réseau de capteurs, sans cesse miniaturisés, dans les domaines de l'environnement et de l'industrie pour la collecte de données les concernant.

Les réseaux de capteurs sans fil RCSF reçoivent aujourd'hui une attention significative aussi bien dans le domaine de la recherche que celui de l'industrie et connaissent un essor important.

Appliqué au secteur de la santé ils permettent de relever de nombreux défis tels que l'accroissement incessant de la demande d'assistance médicale (avec l'accroissement de la populations), l'insuffisance des infrastructures de proximité (hôpital, centre médical) etc.

L'émergence des réseaux de capteurs sans fil s'avère être une véritable bouffée d'oxygène pour de tels secteurs en offrant de nouvelles opportunités telle que l'utilisation des BANs (*Body Area Networks*). Cette technologie vient en aide à la médecine pour le suivi des personnes âgées, des enfants, mais surtout des personnes ayant une maladie chronique en délivrant des alertes en temps réel pour les services d'urgence.

Dans ce chapitre, nous introduisons les réseaux sans fils en général, leurs techniques de transmission, les différentes catégories existantes ainsi que les deux architectures possibles, cellulaires et ad hoc. Par la suite, nous exposerons ce que c'est qu'un nœud capteur, ces composants, les systèmes d'exploitation intégrés, l'architecture et les applications des réseaux de capteurs sans fil. Nous finirons par des notions concernant les réseaux de capteurs corporels sans fil (les réseaux WBAN) : définition, comparaison WBAN/RCSF, composants d'un tel système, catégorie et exemples de capteurs médicaux, l'architecture des systèmes WBAN (*Wireless Body Area Networks*), les topologies existantes et brièvement les technologies de communication WBAN.

I.2 - Les réseaux sans fils

Un réseau sans fil (en anglais *wireless network*) est un ensemble d'appareils (ordinateurs, portables, ...) connectés entre eux, qui peuvent s'envoyer et recevoir des données sans qu'aucune connexion « filaire » physique reliant ces différents composants ne soit nécessaire.

Les réseaux sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes radio-électriques (radio et infrarouges) à la place de câbles habituels. Ces réseaux permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements d'infrastructures comme c'est le cas avec les réseaux filaires ce qui a valu un développement rapide de ce type de technologies.

I.2.1- Techniques de transmission dans les réseaux sans fil

Il existe principalement deux méthodes de transmission dans les réseaux sans fil :

- **Transmission par ondes infrarouges** : cette transmission basée sur une onde lumineuse nécessite que les appareils soient en face l'un de l'autre et qu'aucun obstacle ne sépare l'émetteur du récepteur (*LOS : Line of sight*). Cette technique est utilisée pour créer des petits réseaux de quelques dizaines de mètres (télécommande de télévision, jouets, voitures...).
- **Transmission par ondes radio** : cette transmission est utilisée pour la création de réseaux sans fil de plusieurs kilomètres. Les ondes radios ont l'avantage de ne pas être arrêtées par les obstacles car elles sont émises d'une manière omnidirectionnelle. Les perturbations extérieures sont un problème pour cette technique car ils peuvent affecter la communication à cause de l'utilisation d'une même fréquence par exemple.

I.2.2- Catégories des réseaux sans fil

On spécifie plusieurs catégories de réseaux sans fil, selon la zone de couverture (Figure I.1) :

- **WPAN (Wireless Personal Area Network)** : le réseau personnel sans fil (appelé également réseau individuel sans fil ou réseau domestique sans fil), concerne les réseaux sans fil d'un faible éloignement (environ 10 mètres). Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) à un ordinateur sans liaison filaire. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN la principale technologie étant la technologie Bluetooth.
- **WLAN (Wireless Local Area Network)** le réseau local sans fil est un réseau qui couvre une localisation fixe, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe plusieurs technologies concurrentes pour ce type de réseau sans fil et la plus répandue est le Wifi (ou IEEE 802.11).

- **WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)** : le réseau métropolitain sans fil a une portée de 4 à 10 kilomètres qui fournit un accès réseau sans fil à des immeubles connectés par onde radio à travers une antenne extérieure à des stations centrales reliées au réseau filaire. Le réseau sans fil (MAN – Métropolitain Area Network) appelé aussi « Last Mile Broadband Access Solution » permet des raccordements à des réseaux à large bande dans les secteurs qui ne sont pas servis par le câble ou le xdsl (CrossDigital Subscriber Line). La norme de réseau métropolitain sans fil la plus connue est le WiMAX. [1]
- **WWAN (Wireless Wide Area Network)** le réseau étendu sans fil est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes : GSM, GPRS, UMTS, ...[2].

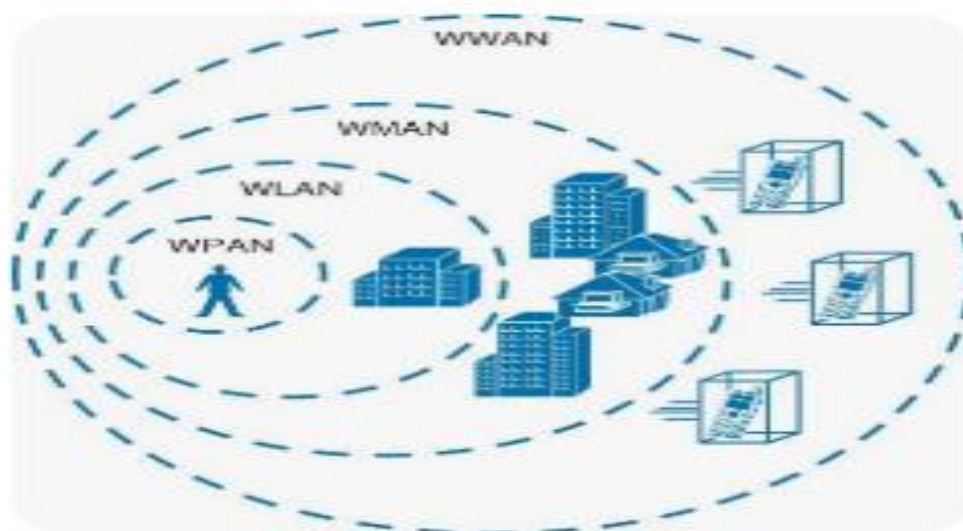


Figure I.1 Catégories de réseaux sans fil

I.2.3- Architecture des réseaux sans fil

On peut distinguer deux modes d'architecture réseaux : mode avec infrastructure (cellulaire) et mode sans infrastructure (ad hoc)[3] .

- **Mode avec infrastructure (cellulaire)**

Les réseaux locaux utilisant une architecture cellulaire sont contrôlés par des stations de base appelées *point d'accès*, gérant l'ensemble des communications au sein d'une même zone géographique (Figure I.2). C'est le même principe de fonctionnement que les téléphones GSM. Le principal avantage de l'utilisation du réseau cellulaire est d'utiliser un minimum de fréquences.

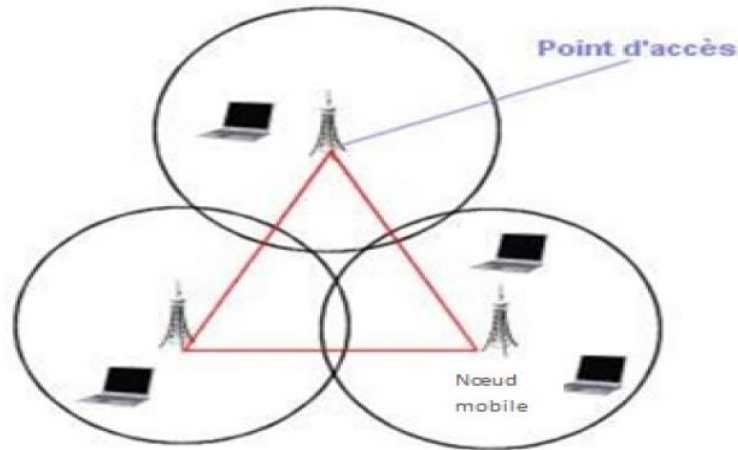


Figure I.2 Mode avec infrastructure

- **Mode sans infrastructure (Ad hoc)**

Le réseau mobile ad hoc est la méthode la plus simple à mettre en œuvre pour un réseau sans fil. Il est créé par une réunion de stations mobiles ou statiques ne possédant pas d'architecture préexistante. Le routage entre les différents points du réseau est donc dynamique. Ce mode de fonctionnement est illustré dans la Figure suivante (Figure I.3) :

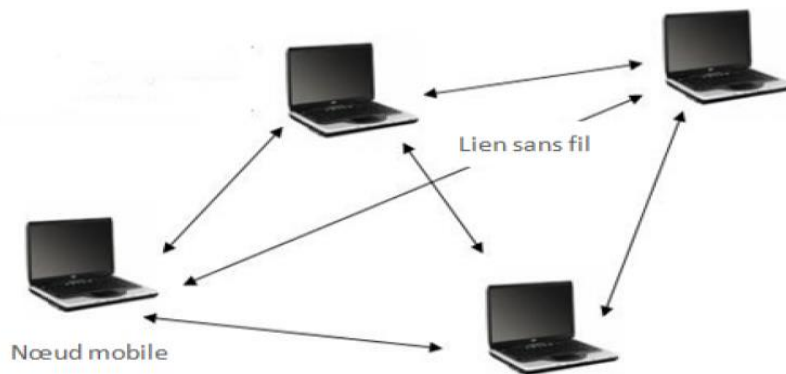


Figure I.3 Mode sans infrastructure

I.3 - Les réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de Capteurs sans fil (*RCSF*) ou *Wireless Sensor Networks (WSN)* sont considérés comme un type particulier de réseaux ad hoc. Ils s'apparentent du fait de leur utilisation commune des ondes radio ainsi que leurs architectures décentralisées [4]. Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de s'auto-organiser, de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome[5] (Figure I.4).

Ces données peuvent être de type : sonores, vibrations, lumière...

La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée « champ de captage » correspondant au terrain d'intérêt du phénomène capté [6].

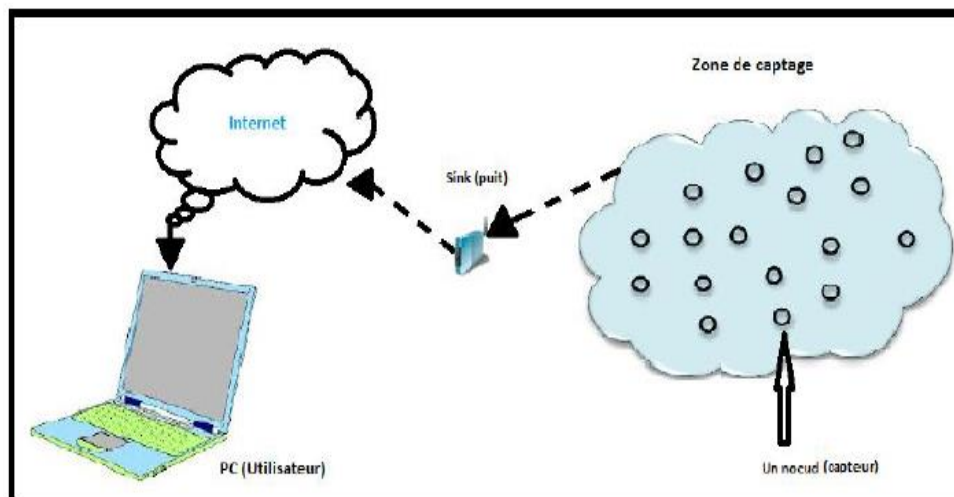


Figure I.4 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

I.3.1- Définition d'un nœud capteur

Un nœud capteur sans fil (dit "mote" en anglais) est un micro-dispositif possédant une source énergétique limitée, capable d'observer un phénomène physique, de recueillir des informations relatives au phénomène observé et de les transmettre vers une unité de traitement via des liaisons radio [7].

I.3.2- Composants d'un nœud capteur

Il est composé principalement d'un processeur, une mémoire, un émetteur/récepteur radio, un ensemble de capteurs, et une pile formant quatre unités de base représentées dans la Figure I.5. [8]

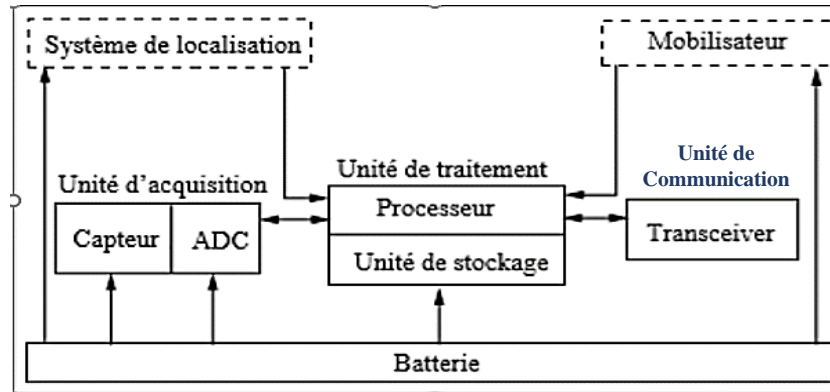


Figure I.5 Anatomie d'un nœud capteur [5]

Ces unités de base sont [5] :

- **L'unité d'acquisition de données (ou de captage)** : composée de deux sous-unités : le récepteur et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique ADC. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement** : Elle comprend un processeur généralement associé à une petite unité de stockage. Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (détaillé dans le paragraphe 1.3.4). Elle exécute des procédures de communications qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits.
- **L'unité de communication** : Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un support « sans-fil » car elle est dotée d'un émetteur/récepteur. Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radiofréquence.
 - Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, ne pouvant pas établir de liaisons à travers des obstacles, elles

présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes.

- Les unités de transmission de type radiofréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ceci implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur. Concevoir des unités de transmission de type radiofréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante. L'alternative consistant à utiliser de longues antennes n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs.

- **L'unité de contrôle d'énergie** : Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie). Étant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est limitée et généralement non-remplaçable. Ceci fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse d'un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et donc du réseau entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc une partie essentielle du système. Elle doit répartir l'énergie disponible aux autres modules, de manière optimale (par exemple en réduisant les dépenses inutiles et en mettant en veille les composants inactifs). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement via des cellules photovoltaïques par exemple [9] [10].

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres sous unités ou composants additionnels, dépendant des applications, tels que les systèmes de localisation GPS.

I.3.3 Architectures des réseaux de capteur sans fil

Les architectures des réseaux de capteurs sans fil peuvent être classées selon la topologie du réseau (architecture physique du réseau) ou suivant le modèle de communication adoptée (architecture logique du réseau) [11].

- **Architecture physique** : elle renvoie à l'organisation ou à la répartition spatiale des nœuds du réseau. Nous pouvons distinguer deux classes :
 - Les réseaux dits plats, où tous les nœuds ont la même responsabilité, donc aucune hiérarchie dans l'organisation comme les cas (1) et (2) de la Figure I.6.

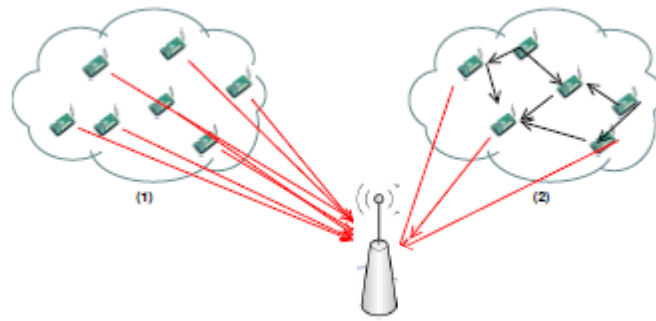


Figure I.6 Architecture plate des réseaux de capteurs sans fil.

Et ceux dits hiérarchiques, cas (3) et (4) illustrés sur la Figure I.7, où les nœuds sont organisés en classes ou *clusters*.

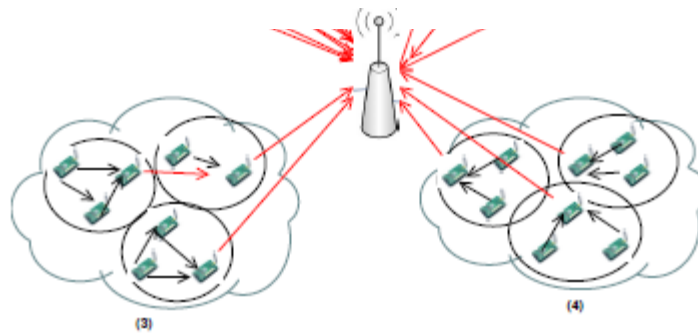


Figure I.7 Réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques.

Deux types de responsabilités peuvent être notés : les nœuds simples et ceux chef de classe ou *cluster head*. Seuls les chefs de clusters ont la possibilité d'interagir avec la station de base, tandis que les nœuds membres d'un cluster doivent nécessairement passer par le cluster head pour atteindre la station de base.

- **Architecture logique** : ou encore architecture de communication, elle représente la manière dont les nœuds du réseau relaient les données de capture jusqu'à l'utilisateur final. Deux modèles de communication peuvent être retenus :

- Le modèle de communication direct ou *single hop* consiste à envoyer les données directement à la station de base cela nécessite une puissance de transmission adaptée par rapport à la position de la station de base (Figure I.8). Cette approche est souvent utilisée dans les réseaux de petite taille. Dans le cas où le réseau serait organisé en clusters, le modèle de communication direct s'applique seulement aux clusters head, qui sont souvent dotés de suffisamment de ressources pour transmettre jusqu'à la station de base.

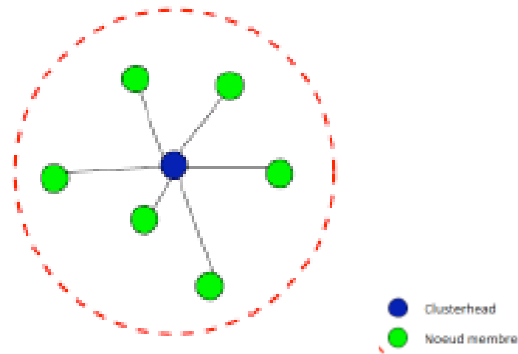


Figure I.8 Communication single hop.

- Le modèle de communication multi-saut ou *multi hop* le plus utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil surtout dans les réseaux denses, il consiste à transmettre les données en passant par des relais pour atteindre la station de base (Figure I.9). Dans le cas d'une architecture plate, les nœuds transmettent l'information vers le voisin le plus proche sur le chemin menant à la station de base. Et quand il s'agit d'un réseau hiérarchique, le même procédé est adopté mais cette fois-ci avec les clusters head, c'est-à-dire, les données sont relayées vers les clusters head les plus proches de la station de base [12].

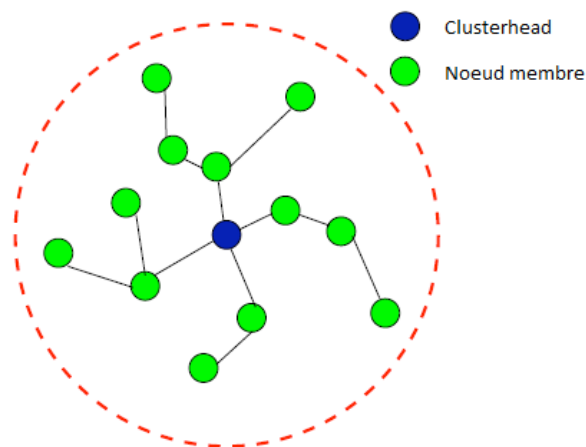


Figure I.9 Communication multi hop.

I.3.4 - Systèmes d'exploitation pour les capteurs

Différents systèmes d'exploitation ont été spécialement conçus pour être implémenté au niveau des capteurs, vu leur faible capacité de mémoire ils ne peuvent supporter des systèmes d'exploitation tel que Windows ou Linux.

Nous décrivons les OS les plus utilisés dans le domaine scientifique qui sont : TinyOS, Contiki et MANTIS OS[13].

- **TinyOS** : est l'un des premiers systèmes d'exploitation open source conçus pour les réseaux de capteurs miniatures, développé par l'université de Berkeley. TinyOS est le plus répandu des OS pour les réseaux de capteurs sans-fil. Il est capable d'intégrer très rapidement les innovations en relation avec l'avancement des applications et des réseaux eux-mêmes tout en minimisant la taille du code source en raison des problèmes inhérents de mémoire dans les réseaux de capteurs.

Les applications pour TinyOS sont écrites en langage de programmation NesC (Network Embedded System C), une extension du langage de programmation C.

Un autre but de TinyOS est de prolonger la durée de vie du capteur. Dans cette optique, la programmation sous TinyOS est une programmation événementielle, c'est-à-dire que l'exécution des différentes instructions s'effectue en fonction des événements enregistrés par l'unité de traitement. Ce type de programmation est adapté aux capteurs car il n'y a de traitement que lors d'apparitions d'événements, ce qui permet au capteur de rester dans un état de veille le reste du temps afin de préserver son énergie.

- **Contiki** : est également un système d'exploitation open source. C'est un système configurable modulaire pour les réseaux de capteurs. L'architecture hybride du noyau Contiki autorise deux modes de fonctionnement : soit multitâche, soit basé sur les événements. Contiki est un système d'exploitation conçu pour prendre le moins de place possible, avec une faible empreinte mémoire. Pour cela, le code est écrit en langage C.
- **MANTIS OS** : MANTIS (Multimodal NeTworks of In-situ micro Sensor) OS apparue en 2005, a été conçue par l'université du Colorado. C'est un système d'exploitation léger et multitâche pour les capteurs adapté aux applications où plusieurs traitements, chacun associé à un ou plusieurs processus, sont en concurrence pour accéder aux ressources du capteur sans fil. La programmation d'application sur MANTIS OS se fait en langage C.

L'économie d'énergie est réalisée par MANTIS à l'aide d'une fonction de veille qui désactive le capteur lorsque toutes les tâches actives sont terminées.

I.3.5 - Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Comme beaucoup de technologie, le développement des RCSFs a été suscité par des besoins militaires.

- **Applications dans le domaine militaire** : en effet, les armées souhaitent être en mesure d'espionner discrètement leurs ennemis. L'absence de câbles entre les nœuds, leur

faible taille, le nombre élevé de capteurs déployés pour couvrir une zone étendue répondent à ces critères [14]. Ainsi plusieurs applications militaires existent telles que le commandement militaire, les systèmes de contrôle, la communication, le calcul, les renseignements, la surveillance et le ciblage [12].

Puis, la diminution des coûts de fabrication des capteurs ainsi que la réduction de leur taille ont entraîné une utilisation dans des applications civiles.

- **Surveillance de l'environnement** : les RCSFs peuvent être utilisés dans le domaine de surveillance domicile (indoor) avec la mesure de la qualité de l'air dans les immeubles et la surveillance des espaces inhabités (outdoor) pour la détection des tremblements de terre, des irrptions volcaniques, des feux de forêts, des inondations, etc [12].
- **Habitats et villes intelligentes** : les réseaux de capteurs sans fil sont aujourd'hui très présents dans les habitations d'où le terme de villes intelligentes. Les capteurs déployés dans les habitations peuvent servir sous plusieurs angles. Ils peuvent : contrôler les fondations et la structure des bâtiments (en génie civil), assurer la gestion des stocks (dans les commerces). Ils permettent la surveillance des trafics (dans les transports), la surveillance de l'éclairage, de la climatisation, du chauffage, de la ventilation (dans la domotique). On parle alors de *smart homes*, *smart office* et *smart cities* [12].
- **Les applications dans l'industrie** : L'utilisation des capteurs est essentielle dans l'industrie car elle assure le lien entre les systèmes de contrôle et le monde physique, de telle sorte à pouvoir détecter des fuites de gaz et/ou d'eau, de suivre en temps réel l'état de santé des machines, contrôler le processus de fabrication, etc [12].
Une utilisation industrielle pourrait être de placer ces capteurs aux points d'usure des machines ce qui permettrait d'émettre des alertes lorsque leur état général se dégrade[14].
- **Applications médicales** : Enfin, l'implantation de capteurs dans le corps humain permettrait de contrôler l'état de santé des patients et ainsi d'adapter leur traitement, de prévenir la dégradation de leur état de santé et par conséquent être capable d'anticiper une hospitalisation en urgence ou alors une prise en charge rapide [14]. Cette

technologie vient en aide à la médecine pour le suivi des personnes âgées, des enfants, mais surtout des personnes ayant une maladie chronique[12] .

I.4- Les réseaux capteurs corporels sans fil (WBAN)

Les réseaux de capteurs corporels sans fil dits WBAN (*Wireless body Area Networks*) sont un type spécial de RCSF associé au corps humain basés sur une transmission par ondes radio. Les systèmes WBAN sont constitués de quelques mini-capteurs portés ou implantés dans le corps humain, ils ont l'avantage d'être légers, de petite taille, et de fonctionner à ultra faible puissance.

Chaque nœud capteur est capable de mesurer, différents types d'information physiologique de la personne (Figure I.10) tels que la température corporelle, le taux de sucre dans le sang, la tension artérielle, le pouls ou le taux d'oxygène dans diverses activités quotidiennes normales, sportives ou tout autre type d'entraînement et même la quantité de calories brûlées après un effort physique.

Le nœud capteur stocke puis transmet les données mesurées - par l'intermédiaire d'un réseau sans fil - au nœud puits. Comme ce dernier a plus de ressources que les autres nœuds, il peut traiter localement les informations reçues et générer des alarmes si nécessaire ou les communiquer à un serveur médical qui fournira en retour des informations en temps réel à l'utilisateur via un médecin [13] [15] [16].

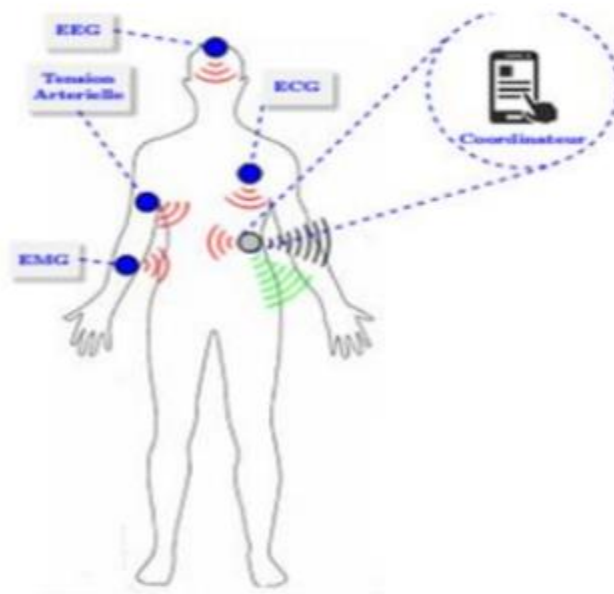


Figure I.10 Réseau de capteurs corporels sans fils

I.4.1- Différence entre WBAN et WSN

Nous présentons ici les différences entre les réseaux WBAN et RCSF qui sont classifiées selon plusieurs facteurs.

Le Tableau I-1 résume ces différences.

Facteur	Réseau	
	WBAN	WSN
Déploiement	Sur le corps humain	Dans des endroits qui ne sont pas facilement accessibles
Densité	Pas dense	Dense
Débit	Actions périodiques	Actions à des intervalles irrégulier
Latence	Facilement accessibles, temps de latence réduit	Difficilement accessibles, temps de latence élevé
Mobilité des nœuds	Nœuds mobiles	Nœuds stationnaires

Tableau I-1 Différences entre WBAN et WSN.

- **Déploiement et densité** : le nombre de nœuds capteurs déployés par l'utilisateur dépend de différents facteurs. Typiquement, les nœuds dans les WBAN sont placés stratégiquement sur le corps humain, ou sont cachés sous les vêtements. Les réseaux WBAN n'emploient pas de nœuds redondants pour faire face à divers types de défaillances. Par conséquent, le nombre de nœuds dans les réseaux WBAN n'est pas dense. Par contre, dans les réseaux WSN, les nœuds sont souvent déployés dans des endroits qui ne sont pas facilement accessibles, ce qui exige de placer un nombre plus élevé de nœuds pour établir une architecture de redondance afin de contourner les problèmes de défaillance des nœuds.
- **Débit de données** : la plupart des réseaux WSN sont utilisés pour la surveillance des événements, qui peuvent se produire à des intervalles irréguliers. Par contre les réseaux WBAN sont utilisés pour mesurer des activités physiologiques et des actions qui peuvent

se produire d'une manière plus périodique et peuvent donner lieu à des flux de données présentant des taux relativement stables.

- **Latence** : dans le cas des réseaux WBAN, le remplacement des batteries pour les capteurs est beaucoup plus facile par rapport au cas dans les réseaux WSN dont les nœuds peuvent être physiquement inaccessibles après le déploiement. Par conséquent, il peut être nécessaire de maximiser la durée de vie des batteries dans un réseau WSN. Le temps de latence dans les WBAN est plus petit par rapport au temps de latence dans les WSN à cause de nombre des sauts réduits.
- **Mobilité** : dans le cas des réseaux WBAN, les personnes portant des capteurs peuvent se déplacer et par conséquent les nœuds capteurs sont des nœuds mobiles contrairement aux nœuds WSN qui sont habituellement considérés comme des nœuds stationnaires.

I.4.2- Composants d'un système WBAN

Les composants suivants constituent un système WBAN efficace [15]:

- **Capteurs** : Ce sont des biocapteurs leur rôle consiste à recueillir des signaux analogiques qui correspondent à des activités physiologiques de l'homme ou à des actions du corps. Ils sont incorporés en fonction de l'application pour la capture de données du monde réel, doivent consommer le moins d'énergie possible et doivent être équipés des modes efficaces *sleep et wake up* (modes 'veille' et 'réveil') pour garder un matériel fonctionnel efficace.
- **Communication de données** : la communication sans fil est la principale source de transmission, mais elle devrait être opérationnelle dans les bandes de fréquences qui sont tolérantes aux interférences, sans qu'il y ait une superposition de fréquences pendant le fonctionnement en temps réel.
- **Sécurité** : les protocoles du WBAN doivent être très sécurisés, pour cela les données doivent être transmises via le système WBAN à un endroit éloigné avec un chiffrement efficace.
- **Mécanisme de handover** : il est également souhaitable d'avoir un mécanisme de handover dans le système WBAN en utilisant une passerelle ou un routeur sans avoir de nœud en état de surcharge.
- **Antenne** : une antenne de très petite taille doit être mise en œuvre dans le système WBAN pour fonctionner à haute fréquences.

- **Nœud passerelle** : les composants de la passerelle doivent être conçus pour interagir avec les réseaux sans fil dans les systèmes médicaux avec des algorithmes perfectionnés ayant une technique d'apprentissage automatique ou en profondeur afin qu'une capture et retransmission des données soient possibles.
- **Mécanisme de sauvegarde** : tout système WBAN doit être équipé d'un système de sauvegarde (backup) pour déclencher une alarme en cas de faible puissance ou de défaillance d'un nœud.

I.4.3- Catégories des nœuds capteur WBAN

Chaque nœud du WBAN fonctionne comme un appareil autonome entièrement équipé d'un système de communication pour relayer les données au serveur médical. Les nœuds opérants dans les WBAN sont classés selon leurs fonctionnalités, implémentation et rôles.

Sur la base des fonctionnalités, les nœuds du WBAN sont les différents types suivants [15]:

a) Unité de contrôle du corps (BCU : Body Control Unit) : elle collecte toutes les informations des capteurs et actionneurs fonctionnant en tant qu'éléments d'un système WBAN.

b) Capteurs : les applications WBAN vont du médical aux applications non médicales. Les applications non médicales comprennent le mouvement et les divers gestes pour détecter la condition physique, les interactions sociales et même l'assistance médicale dans des situations variées comme les inondations, tremblements de terre, incendies, etc.

Les applications médicales comprennent les applications basées sur les soins de santé. Selon les situations, divers capteurs sont disponibles, portables ou implantables pour transmettre des signaux physiologiques. Généralement, les capteurs corporels suivants sont utilisés pour surveiller la santé (appelés aussi biocapteurs) :

- **Capteurs de mouvement inertiel** : pour mesurer la posture du corps (positions du corps) et le mouvement, tels que les accéléromètres (mouvements de translation) et gyroscopes (mouvements angulaire).
- **Capteurs bioélectriques** : pour mesurer les variations électriques chez un patient relatives à certaines activités d'organes tel que : ECG, EMG.
- **Capteurs électrochimiques** : mesurent certains agents chimiques du corps humain comme le capteur de glucose.

- **Capteurs optiques** : pour déterminer le degré d'absorption de la lumière traversant les vaisseaux sanguins du patient, comme le capteur d'oxymétrie qui détermine le taux de saturation d'oxygène SpO₂ dans le corps.
- **Capteurs de température** : mesure la température du corps du patient.

Si on prend en considération la technologie des capteurs WBAN, différents capteurs portables et implantables sont disponibles.

Voici une liste de biocapteurs portables et implantables [15]:

Capteurs portables : l'objectif principal des capteurs portables est de recueillir tous types de données physiologiques et celles de mouvement du patient pour faciliter la surveillance médicale à distance de ce dernier. Les capteurs portables sont utilisés à la fois pour le diagnostic et les applications de surveillance qui incluent la détection biochimique et la détection de mouvement.

- **Capteur électrocardiographique (ECG)** : le capteur ECG surveille l'énergie électrique produite au cours d'un battement de cœur. Les changements dans l'énergie électrique sont détectés via deux fils référencés par rapport à la mise à la terre. Tous les changements d'énergie sont visualisés sous forme d'ondes. Le capteur ECG est fixé sur le corps du patient en utilisant des électrodes placées sur la poitrine côté gauche et côté droit, il fournit un signal analogique en sortie converti par un ADC (convertisseur analogique-numérique) et envoyé à un téléphone portable à travers le module Bluetooth.
- **Capteur de fréquence cardiaque** : le capteur de fréquence cardiaque mesure la fréquence cardiaque en battements par minute à l'aide d'une Source optique à LED et d'un capteur de lumière LED.
- **Capteur électromyographique (EMG)** : ce capteur est utilisé pour mesurer l'activité électrique musculaire sur l'ensemble du corps du patient. Il est utilisé comme signal de contrôle pour tous types de prothèses.
- **Capteur d'électroencéphalographie (EEG)** : il est principalement utilisé pour détecter et obtenir toute l'activité électrique du cerveau. Il mesure tous types de fluctuations de tension résultant d'un courant ionique dans les neurones du cerveau.
- **Capteur de température corporelle** : il est utilisé pour mesurer la température corporelle du patient. Ce capteur est très utile car différentes maladies créent des fluctuations de la

température corporelle du patient. Il est utilisé pour surveiller le patient dans des conditions critiques pour avoir une observation précise.

Capteurs implantables : les capteurs implantables sont principalement utilisés pour déterminer la force, le couple, la pression ou la température à l'intérieur du corps humain. De très petite taille ils sont compatibles avec les tissus humains et peuvent résister à toutes les forces physiques à l'intérieur du corps humain. Les capteurs implantables ont un mécanisme d'auto-alimentation et une transmission sans fil des données.

Parmi les capteurs implantables :

Pacemaker : Le stimulateur cardiaque est un petit appareil placé dans la poitrine ou l'abdomen pour contrôler toutes sortes de rythmes cardiaques anormaux dans le corps d'un patient connu sous le nom d'arythmies. Un stimulateur cardiaque (pacemaker) peut contrôler deux types d'arythmies - Tachycardie (rythme cardiaque rapide) et Bradycardie (rythme cardiaque lent).

Implants cochléaires : dispositif électronique pour faciliter le fonctionnement des parties endommagées de l'oreille interne et fournir des signaux sonores au cerveau.

c) **Actionneur** : la tâche principale de l'actionneur est d'interagir avec l'utilisateur lors de la réception des données de capteurs. Il fournit des informations en retour dans le réseau basé sur ces données.

Sur la base de l'implémentation, les nœuds du WBAN sont classés comme suit [15] :

- 1) **Nœud implanté** : nœud implanté dans le corps humain soit juste au-dessous de la peau ou du tissu corporel.
- 2) **Nœud de surface du corps** : nœud principalement installé sur la surface du corps du patient.
- 3) **Nœud externe** : Nœud qui n'a pas de contact direct avec le corps mais il est placé à une distance de 5--10 cm de celui-ci.

Sur la base du rôle, les nœuds du WBAN peuvent être classés comme suit [15]:

- 1) **Nœud coordinateur** : agit comme une passerelle vers le monde extérieur ou un autre coordinateur WBAN ou d'accès.
- 2) **Nœud terminal** : exécute certaines fonctions prédéfinies dans le WBAN.
- 3) **Nœud relais** : nœuds intermédiaires entre les nœuds parent et enfants.

I.4.4- Topologies des réseaux WBAN

La topologie est définie comme un arrangement systématique du réseau de capteurs corporels dans un réseau existant, qui remplit toutes les exigences de base de l'application [15]

Les topologies les plus utilisées pour le déploiement des réseaux WBAN sont les suivantes : point-à-point, étoile, maille et arbre. La Figure I.11 montre ces quatre topologies [13].

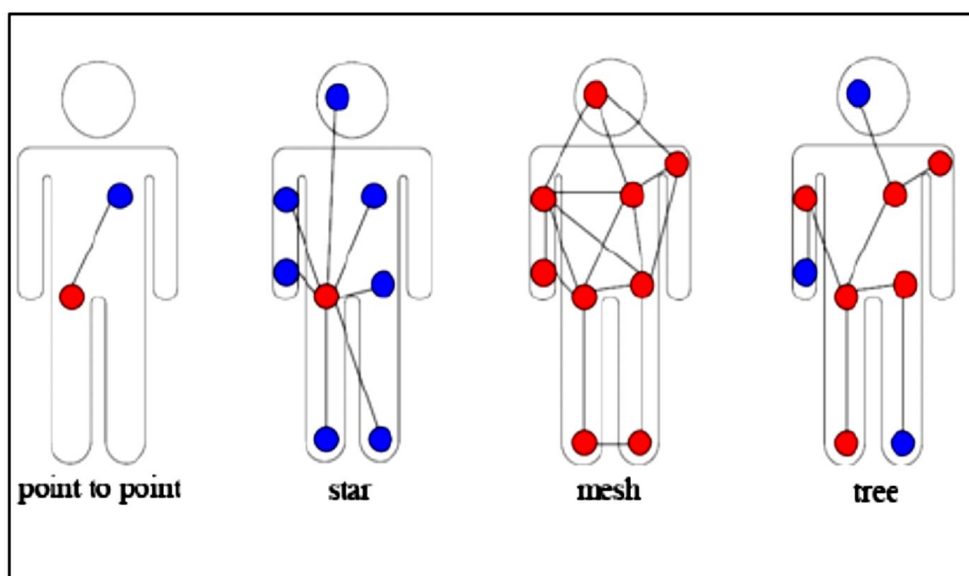


Figure I.11 Topologies dans les réseaux WBAN.

- **Topologie Point-à-point (point to point) :**

C'est la topologie la plus simple dans les réseaux. Dans laquelle deux nœuds différents sont connectés directement entre eux sans aucun périphérique intermédiaire, et la communication se fait pair à pair (peer to peer).

Les avantages de cette topologie sont la faible latence et le débit élevé et ses inconvénients comprennent ses fonctionnalités limitées ainsi que sa faible couverture [15] [13].

- **Topologie en étoile (Star) :**

Une topologie dans laquelle l'ensemble du réseau WBAN est géré par un seul nœud central (nœud Maître ou puits) qui a une capacité de puissance supérieure à celle des autres

nœuds. Dans la topologie en étoile, tous les nœuds capteurs attachés au corps du patient communiquent via la passerelle pour transmettre les données collectées, mais un seul nœud peut rester actif et transmet les données à des instants périodiques pour éviter toute sorte de collisions avec d'autres nœuds capteurs [13] [15] .

Les avantages de cette topologie se résument en la simplicité, la faible consommation d'énergie des nœuds et la moindre latence de communication entre les nœuds et le nœud central. Par contre, son inconvénient majeur est la vulnérabilité du nœud central car tout le réseau est géré par un seul nœud.

- **Topologie en maille (Mesh) :**

Une topologie avec une connectivité complète entre les nœuds est une topologie maillée, c'est-à-dire tous les nœuds peuvent échanger avec n'importe quel autre nœud du réseau soit de façon directe s'il est à la portée de transmission soit en mode multi-sauts. Dans ce dernier cas un nœud voulant transmettre un message à un autre nœud hors de sa portée de transmission, peut utiliser un nœud intermédiaire pour envoyer son message au nœud destinataire.

L'avantage d'utiliser la topologie en maille est la possibilité de passer à l'échelle du réseau, avec redondance et tolérance aux fautes et une bonne couverture. Par contre, les inconvénients d'une telle topologie sont l'importante consommation d'énergie induite par la communication multi-sauts ainsi que la latence créée par le passage des messages à travers plusieurs nœuds avant d'arriver au nœud destinataire [15] [13] .

Son utilisation favorise toutes les situations dans lesquelles la fiabilité et la communication flexible sont prioritaires par rapport à l'efficacité énergétique et la durée de vie du réseau.

- **Topologie en arbre (Tree) :**

Une topologie en arbre contient un sommet avec une structure de branches au-dessous. Les connexions entre les nœuds sont structurées hiérarchiquement, ce qui signifie que chaque nœud peut être un fils à un nœud de niveau supérieur et un père à un nœud de niveau inférieur.

Cette topologie divise le réseau en sous-parties de sorte qu'il devient plus facile à gérer. Elle présente une bonne tolérance aux fautes, une bonne couverture, une faible latence et

surtout une bande passante élevée. Toutefois, les nœuds pères peuvent consommer beaucoup d'énergie [13] [15].

I.4.5- Architecture de communication dans les systèmes WBAN

La Figure I.12 ci-dessous illustre une architecture générale d'un système WBAN de surveillance médicale, où plusieurs types de capteurs corporels envoient leurs données mesurées à un serveur par le biais d'une connexion sans fil (téléphone portable ou ordinateur portable par exemple). Ensuite, ces données sont transmises (via internet par exemple) à l'équipe médicale pour obtenir un diagnostic en temps réel ou à une base de données médicale pour les enregistrer, ou bien à un équipement correspondant qui émet une alerte d'urgence en cas de condition critique du patient.

Les communications dans un système WBAN peuvent être classées en trois niveaux [15] [13] : Communications «Intra-BAN», Communications «Inter-BAN» et Communications « Au-delà de BAN».

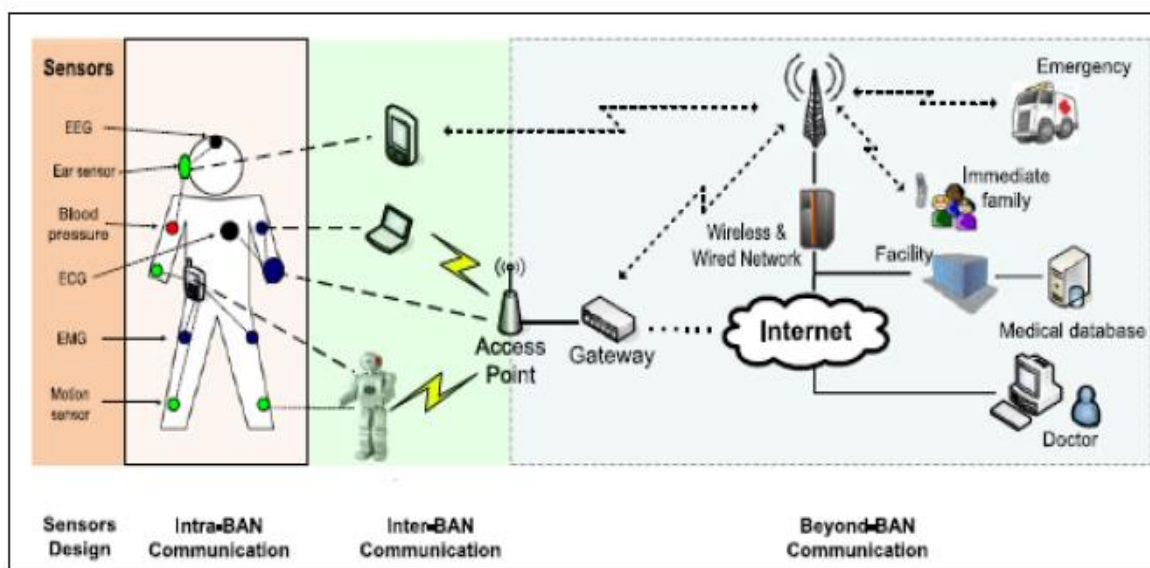


Figure I.12 Architecture générale des communications dans un système BAN.

I.4.5.1- Communications de niveau 1 : autour du corps (intra BAN)

Nous définissons le niveau 1 comme étant toutes les communications internes, c'est-à-dire l'émetteur et le récepteur sont à la fois placés sur les différentes parties du corps humain [15] , les communications peuvent être entre ces différents capteurs corporels ou entre les capteurs corporels et le nœud puits (PDA, téléphone mobile, capteur, etc). Ce dernier est caractérisé

par une puissance de calcul et une réserve d'énergie plus importante par rapport aux capteurs corporels[13] .

La position des nœuds capteurs dépend de la surveillance du patient et dépend des statistiques vitales de la maladie à surveiller. Les patients doivent maintenir les capteurs à leur place pour permettre aux médecins de surveiller la santé du patient en permanence de n'importe où et à tout moment [15] .

Les capteurs relevant de « Communications intra-BAN » sont placés à environ deux mètres près du corps humain. La conception d'un Intra-BAN est très important vu que le patient et les capteurs corporels ont un contact direct.

En outre, Les protocoles MAC doivent être conçus de telle manière à ce que les capteurs continuent de fonctionner pendant une longue période[15] .

I.4.5.2- Communications de niveau 2 : entre corps (inter BAN)

Tout comme le comportement autonome des RCSF, les systèmes WBAN doivent travailler de manière hautement autonome [15].

En termes d'architecture WBAN, les Communications Inter-BAN sont principalement concernés par la communication des modules (WBANs adjacents). Ce type de communication relie le nœud puits à un ou plusieurs points d'accès (ordinateur portable ou une tablette). Les points d'accès forment une part particulière dans l'infrastructure WBAN qui permet de connecter le WBAN aux différents autres réseaux et d'accéder de manière ordinaire comme un réseau de communication mobile ou Internet [16] [17] [13] . Ici la topologie en étoile est considérée comme très appropriée pour la communication Inter WBAN.

La communication Inter-BAN peut opérer dans deux catégories principales [15] [13] selon la configuration des points d'accès :

- Basée sur l'infrastructure : une bande passante élevée est fournie avec une administration centralisée et le système WBAN peut être qualifié de très robuste et évolutif.
- Basée sur un réseau Ad hoc : un déploiement rapide peut être possible (environnement dynamique) de telle manière à ce qu'une architecture dynamique et une mobilité élevée peuvent être atteints.

I.4.5.3- Communications de niveau 3 : au-delà du corps (Beyond BAN)

Pour avoir une bonne transition entre les niveaux 1 et 2, c'est-à-dire Intra -BAN et Inter -BAN, une passerelle est déployée pour créer un lien sans fil entre les deux.

Au niveau 2, les données du patient peuvent être surveillées (système WBAN évolutif), par le médecin via une application mobile ou un site Web ou en utilisant un accès sécurisé à des fichiers spécifiques de serveurs médicaux [15].

Dans la communication de niveau 3, au-delà du BAN, les communications sont entre le point d'accès et une équipe médicale ou un serveur médical via une passerelle vers le réseau Internet ou un réseau cellulaire. Ce serveur est considéré comme une base de données qui contient tous les enregistrements de données du patient tel que l'historique, le statut médical actuel et d'autres informations personnelles. Ces informations peuvent améliorer l'application de surveillance médicale en permettant aux personnels de la santé (médecins et infirmiers) d'accéder à distance aux informations médicales des patients et d'intervenir dans les cas d'urgences [16] [17] [13].

De plus, la base de données et les autres données du patient sont également accessibles par d'autres proches de l'utilisateur [15].

La conception des composants du niveau-3 est basée sur les applications.

I.4.6- Technologies de communication WBAN

WBAN prend en charge un certain nombre de technologies à courte portée pour communiquer avec la passerelle, par exemple, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, ZigBee et IEEE 802.15.6. Toutes ces technologies de communications à courte portée possèdent des caractéristiques variées et prennent en charge différentes fréquence de fonctionnement et topologies de réseau [16].

D'un autre côté la communication entre la passerelle et le serveur utilise des technologies de communication longue portée telles que WiMax, LTE et LTE-Advance.

Nous verrons plus en détails un certain nombre de technologies à courte portée et leurs caractéristiques, pour les réseaux WBAN uniquement, dans le deuxième chapitre.

I.5- Conclusion

En parcourant ce chapitre nous noterons une présentation des réseaux sans fil et leur architecture avec infrastructure et sans infrastructure, qui a permis d'introduire par la suite les

réseaux de capteurs sans fil en passant par la notion de nœud, nous avons également cité les différentes applications de ces réseaux.

Nous nous sommes intéressés plus spécialement aux applications médicales d'où la nécessité de présenter les réseaux de capteurs corporels sans fil WBAN, les composants d'un tel système, la classification des nœuds capteurs selon leur fonctionnalités, implémentation et rôle et par la suite l'architecture des WBAN qui nous amène à discuter les différents protocoles existants sur les trois niveaux.

Cette discussion fera l'objet du prochain chapitre ainsi que la conception d'une architecture de communication pour un réseau WBAN.

CHAPITRE II
ETUDE DES PROTOCOLES ET
ATTRIBUTS DANS LES
RÉSEAUX WBAN

II.1- Introduction

Le réseau de capteurs corporels sans fil WBAN a une architecture en couches qui caractérise les activités associées au réseau de manière efficace. Chacune des couches de ce réseau est définie avec les spécifications associées à sa propre responsabilité, ces restrictions et ces défis.

La conception actuelle des différentes couches de communication dépend du protocole ou de la technologie utilisée pour la communication. Mais en général, une conception et implémentation appropriées de la couche physique (PHY) et de la couche (MAC) sont les plus importantes pour tout protocole WBAN.

Pour cela nous commençons par définir dans ce chapitre les différentes couches de l'architecture réseau des WBAN ainsi que les défis spécifiques à chaque couche. Nous continuons avec les principales caractéristiques (attributs) d'un système WBAN tel que la fiabilité, évolutivité et efficacité énergétique et bien d'autres. Par la suite nous détaillerons les différents protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs sans fils et plus particulièrement le WBAN. Pour finir une discussion sur les techniques MAC et celle de routage est effectuée.

II.2- Architecture réseau pour les WBAN

II.2.1- Couche physique PHY

PHY est la couche inférieure de la pile de communication des WBANs. Elle définit le mécanisme d'envoi et de réception des bits d'information sur un support sans fil dont la propagation et la mobilité des ondes radioélectriques sont particulières dans le WBAN par rapport à un réseau de capteurs WSN à grande échelle typique. Ces ondes sont influencées par les caractéristiques et les mouvements du corps humain, alors, il est nécessaire de maintenir la puissance d'émission à son minimum pour économiser l'énergie et limiter les interactions avec le porteur.

L'amélioration de la puissance de transmission du nœud capteur lors de l'envoi de données sans fil est basée sur trois facteurs qui sont :

- Le rapport signal/bruit SNR (Signal-to-Noise Ratio) qui dépend de la qualité de la liaison de communication,

- Facteur de bruit de réception RNF (Receive Noise Figure) un facteur qui dépend du composant.
- La perte de trajectoire du corps BPL (Body Path-Loss) est influencée par l'antenne utilisée et le diagramme de rayonnement[18] .

Certaines des principales responsabilités de la couche physique comprennent la sélection de fréquence, la détection du signal, la modulation et le cryptage.

Pour les capteurs on-body, les bandes de fréquences sont : 13,5 MHz, 5-50 MHz, 400 MHz, 600 MHz, 900 MHz, 2,4 GHz et 3,1-10,6 GHz [17]. La Commission Fédérale de Communication (FCC) a attribué la bande de fréquences de 402 à 405 MHz pour les services de communication des implants médicaux (MICS) car il s'agit d'un spectre à ultra-faible puissance, sans licence et ne causera pas d'interférences aux autres utilisateurs du spectre radio.

- Défis de la couche physique WBAN

Voici certains des défis liés à la couche physique (Figure II.1) qui doivent être pris en compte lors de la conception du WBAN [19] [20] :

- *Interopérabilité* : WBAN se compose de divers appareils de différents types ayant différentes propriétés et fonctionnalités. De plus, ils peuvent être fabriqués par différents fournisseurs. Cela provoque des problèmes d'interopérabilité au sein des composants du WBAN.
- *Besoins en bande passante variables* : pour différentes applications médicales, les besoins en bande passante dépendent du type de données transmises sur un réseau WBAN. Donc, il est souhaitable de choisir la bande radio sans fil et la bande passante intelligemment pour qu'elles puissent accueillir des applications variées dans un même WBAN.
- *Débits de données variables* : Les différents nœuds d'un WBAN peuvent avoir des objectifs différents et exécuter des tâches différentes, ils peuvent générer des débits différents. La couche physique d'un WBAN doit être capable de gérer ces différents débits de données dans le même réseau.
- *Contrôle de la température* : La chaleur et le rayonnement générés par les dispositifs implantés peuvent affecter les tissus corporels et d'autres dispositifs à proximité. Par conséquent, l'objectif de conception de ces dispositifs doit prendre en considération cette question.

- *Changement de topologie* : La topologie du WBAN change en même temps que le mouvement du corps. Cela rend la connexion entre les appareils instable. Le WBAN doit pouvoir s'adapter à la topologie dynamique.
- *Interférence* : Le fonctionnement des dispositifs WBAN peut être affecté par les interférences causées par d'autres dispositifs environnants, la chaleur et les radiations, les tissus corporels, les fluides et les produits chimiques, etc. Ces types d'interférences doivent être minimisés pour le bon fonctionnement du WBAN tout en coexistant avec d'autres dispositifs et réseaux.
- *Sensibilité à la tolérance aux pannes* : différents facteurs tels que le changement de topologie, l'influence de l'environnement, la puissance de transmission, etc. rendent le WBAN vulnérable aux pannes. Pour maintenir un fonctionnement correct et une connectivité transparente, les WBAN doivent être tolérants aux pannes.
- *Signalisation constante* : De nombreux cas de télésurveillance médicale nécessitent une surveillance continue et en temps réel. Le WBAN doit être capable d'effectuer une tâche de signalisation constante de manière fluide et continue.
- *Sécurité* : Les menaces de sécurité telles que l'écoute, la falsification et le brouillage sont généralement ciblées sur la couche physique. Il est donc souhaitable de détecter ces types d'attaques et de mettre en œuvre des mesures préventives au niveau physique.
- *QoS* : Étant donné que le WBAN est lié à la santé et à la vie humaine, il est de la plus haute importance de maintenir la qualité de service dans les opérations du WBAN. Dans la couche physique, la qualité de service est généralement déterminée par le débit de communication, la fiabilité et l'efficacité énergétique, qui peuvent être obtenus par un codage de canal adaptatif, une mise à l'échelle de la puissance et une division efficace des intervalles de temps.

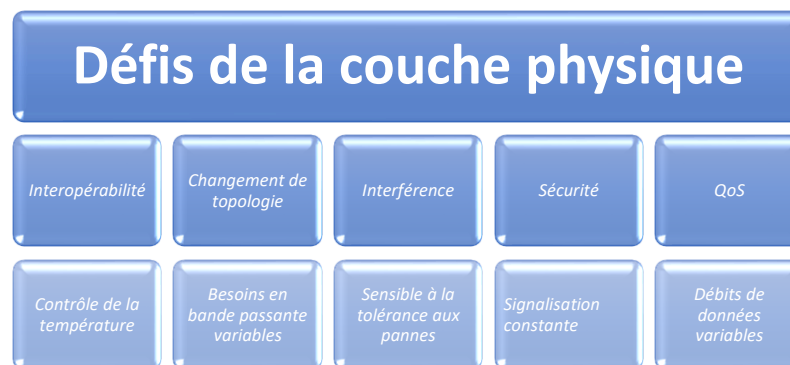


Figure II.1 Défis de la couche physique

II.2.2- Couche liaison de données

Cette couche est responsable du multiplexage, de la détection des trames, de l'accès au canal et de la fiabilité. Au niveau de la couche MAC (Media Access Control) une collision se produit lorsque deux nœuds ou plus tentent de transmettre en même temps [17] car Les nœuds d'un WBAN ont un canal sans fil commun pour la transmission des données et l'accès à ce canal commun est contrôlé par un MAC commun alors pour assurer l'efficacité énergétique on a deux catégories de protocoles MAC qui sont : le protocole MAC sans contention et le protocole MAC basé sur la contention.

- Défis dans la couche MAC du WBAN

Il existe des défis spécifiques à la couche MAC qui doivent être relevés. En voici quelques-uns (Figure II.2) [19] [20]:

- *Synchronisation* : Pour la surveillance en temps réel et la transmission des données, une synchronisation parfaite entre les deux extrémités communicantes est cruciale.
- *Débit* : L'échange de paquets de contrôle et les faibles cycles d'utilisation entraînent un faible débit dans les WBAN. Le choix de cycles d'utilisation auto-ajustables dans les protocoles peut résoudre ce problème.
- *Cohérence* : Le WBAN traite des données cruciales. Il est donc essentiel de minimiser les pertes de données qui affectent directement la cohérence ou la fiabilité du WBAN.
- *Calibrage* : en raison de plusieurs facteurs tels que le bruit aléatoire, défaut du nœud capteur, blocage d'un nœud, détériorations, erreurs aléatoires, vieillissement, etc., l'étalonnage dans le WBAN est difficile. Les WBAN ont besoin de mécanismes d'auto calibrage pour surmonter tous cela.
- *Ordonnancement des paquets* : dans les applications médicales, différents paquets peuvent avoir des priorités différentes. Par exemple, certains paquets peuvent nécessiter une livraison plus rapide, mais pour certains paquets, une livraison fiable est plus importante. Par conséquent, les protocoles de la couche MAC du WBAN doivent adopter des méthodes d'ordonnancement efficaces.
- *Affectation dynamique de canaux* : la présence de bruit et d'interférences dans le canal de communication est à l'origine d'un faible débit, d'un retard important et d'une

grande perte de données. Pour faire face à cela, les protocoles de la couche MAC doivent prendre en charge le partage dynamique du canal et l'attribution efficace de la bande passante.

- *Conception multi-radio et multi-canal* : en plus du partage dynamique du canal, pour améliorer la capacité du réseau ainsi que les performances globales du WBAN, au lieu d'un canal fixe, plusieurs canaux doivent être utilisés pour la transmission de données, en particulier pour les données d'urgence. Le protocole de la couche MAC devrait fournir cette fonctionnalité.
- *Contrôle de la surcharge des paquets (overhead)* : la taille des paquets de contrôle doit être aussi faible que possible car ils ne transportent aucune donnée médicale mais consomment une quantité importante d'énergie.
- *Surcharge du protocole* : La majorité des protocoles contiennent des informations supplémentaires, en plus des données actuelles, telles que les adresses de la source, de la destination, le type de paquet, le type de capteur, la priorité du numéro de séquence, le checksum, la longueur du message, timestamp (Horodatage), etc. dans chaque paquet transmis. Cela mène à une surcharge de transmission et une consommation en bande passante. Les protocoles doivent minimiser ces overheads au maximum quand c'est possible.
- *Ecoute passive* : l'écoute passive se produit soit lorsqu'un nœud est censé recevoir certains paquets, mais qu'aucun paquet n'est reçu, soit lorsqu'un nœud écoute un canal inactif. La gestion de l'écoute à vide est très importante pour le WBAN car elle consomme beaucoup d'énergie inutilement.
- *Sur-émission* : parfois, en raison d'un manque de synchronisation entre la source et le nœud puits (sink), ceci provoque un débordement des données générées car le destinataire n'est pas prêt à recevoir des données au même débit. Ceci doit être évité à cause du gaspillage inutile d'énergie et l'occupation du canal inutilement qui dégrade à leur tour les performances globales du WBAN.
- *Sur écoute (Overhearing)* : lorsqu'un nœud reçoit un paquet qui ne lui ai pas destiné mais il est destiné à un autre nœud. Cela implique un traitement inutile et un gaspillage d'énergie qui doit être évité.

- *Économie d'énergie* : la préservation d'énergie est cruciale pour WBAN. Il est donc nécessaire d'utiliser l'énergie d'une façon optimale et de prendre en compte tous les facteurs mentionnés ci-dessus qui entraînent une consommation d'énergie inutile.
- *Contrôle du flux de données* : le manque de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur provoque une submersion de données au niveau du récepteur. Cela cause un retard de propagation et un retard de transmission. L'objectif du protocole de la couche MAC devrait être de minimiser ces retards en contrôlant le taux de génération et de flux de données.
- *Contrôle de délai* : dans un réseau très actif, les faibles cycles de service cause un retard dans la transmission des paquets. Pour réduire le délai de transmission, les données peuvent être instantanément transférées au lieu d'être mises en mémoire tampon.
- *Contrôle d'erreurs* : en raison de plusieurs facteurs, les opérations WBAN subissent des erreurs en raison desquelles les données liées à la santé sont perdues ou endommagées. C'est pourquoi des systèmes de contrôle d'erreurs doivent être adoptés pour garantir la fiabilité.
- *Tolérance aux pannes* : la tolérance aux pannes dans la couche MAC peut être obtenue en adoptant la gestion des priorités, en ajoutant de nouveaux nœuds, et en ayant un chemin et des ressources redondants.
- *Sécurité* : privation de sommeil, falsification, écoute clandestine, nœud compromis, sybil, collision, injustice, épuisement, etc. sont des exemples d'attaques de sécurité spécifiques à la couche MAC. Les protocoles doivent être dotés de systèmes de sécurité appropriés pour protéger le WBAN contre ces attaques.
- *QoS* : La qualité de service dans la couche MAC peut être obtenue par l'application appropriée d'un codage de canal adaptatif, d'une adaptation de puissance et d'une division des intervalles de temps.



Figure II.2 Défis de la couche MAC

II.2.3- Couche réseau

Généralement, les nœuds du WBAN ne sont pas tenus d'acheminer les paquets vers d'autres nœuds. Mais le routage à sauts multiples dans les réseaux WBAN est plus adéquat par un protocole qui est responsable de la livraison effective et efficace des paquets de la source à la destination[21], sa principale tâche est de localiser, d'établir et de maintenir les routes.

Il est nécessaire d'établir ce protocole pour garantir une faible puissance de transmission, une faible consommation d'énergie et un routage efficace des données en répartissant la charge de routage sur l'ensemble du réseau[17].

De plus, le routage est possible lorsque plusieurs WBAN communiquent entre eux via leurs coordinateurs [22]. Les coordinateurs WBAN peuvent exploiter la communication coopérative et multi-sauts corps à corps pour renforcer la connectivité réseau de bout en bout.

- Les défis de la couche réseau du WBAN

Voici les défis (Figure II.3) qui doivent être relevés par la couche réseau des protocoles WBAN[20]:

- *Routage optimal* : La réalisation d'une communication efficace sur le WBAN est difficile, principalement en raison de la largeur de bande limitée qui varie en fonction de la présence d'évanouissements, de bruit et d'interférences. Il est nécessaire de parvenir à un routage optimal et de mettre en œuvre des techniques de routage efficaces et améliorées.

- *Routage multi-chemins* : pour une communication fiable et robuste, les protocoles de routage doivent adopter un routage multi-chemins et multi-points.
- *État du réseau* : Pour une transmission fiable, les conditions du réseau doivent être stables. Il est donc important de vérifier périodiquement les paramètres tels que le canal, les informations de la mémoire tampon, la mesure des priorités, etc.
- *Diffusion en temps réel* : de nombreux scénarios de surveillance médicale à distance nécessitent une transmission de données en temps réel. Il est de la responsabilité des couches réseau de s'assurer que dans de tels cas, les paquets parviennent à destination en temps voulu. En cas de retard, le pire temps de transmission et sa probabilité doivent également être estimés.
- *Localisation* : Dans le cas du WSN, la qualité de la transmission des données dépend de la distance entre le nœud émetteur/récepteur et le point d'accès le plus proche. Étant donné que le WBAN peut être mobile, il est nécessaire d'ajuster la localisation des nœuds en fonctionnement chaque fois qu'il y a un déplacement des nœuds par rapport au point d'accès.
- *Mobilité* : La mobilité dans le WBAN, en particulier dans le cas des dispositifs portables et de fitness, constitue un défi pour identifier l'itinéraire le mieux adapté dans un tel environnement dynamique ou mobile.
- *Contrôle du trafic* : pour contrôler la congestion et le débit de transmission, il est nécessaire de concevoir et d'adopter un protocole de routage de contrôle de trafic efficace.
- *Sécurité* : le réseau est sujet à plusieurs attaques de sécurité telles que sybil, nœud compromis, mauvaise direction, trou noir, attaques de transfert sélectif, etc. Les protocoles de la couche réseau doivent être capables d'atténuer ces attaques.
- *Tolérance aux pannes* : Comme les autres couches de la communication WBAN, la couche réseaux doit également être tolérante aux pannes qui sont censées survenir dans cette couche, par exemple les fautes dans les topologies de réseau et le routage.

- *QoS* : La qualité de service dans la couche réseau peut être améliorée en tenant compte de facteurs tels que l'amélioration de la latence du chemin, le contrôle de l'encombrement, un routage robuste, la prise de mesures appropriées en cas de paquets perdus et endommagés, qui contribuent à améliorer la qualité de service.

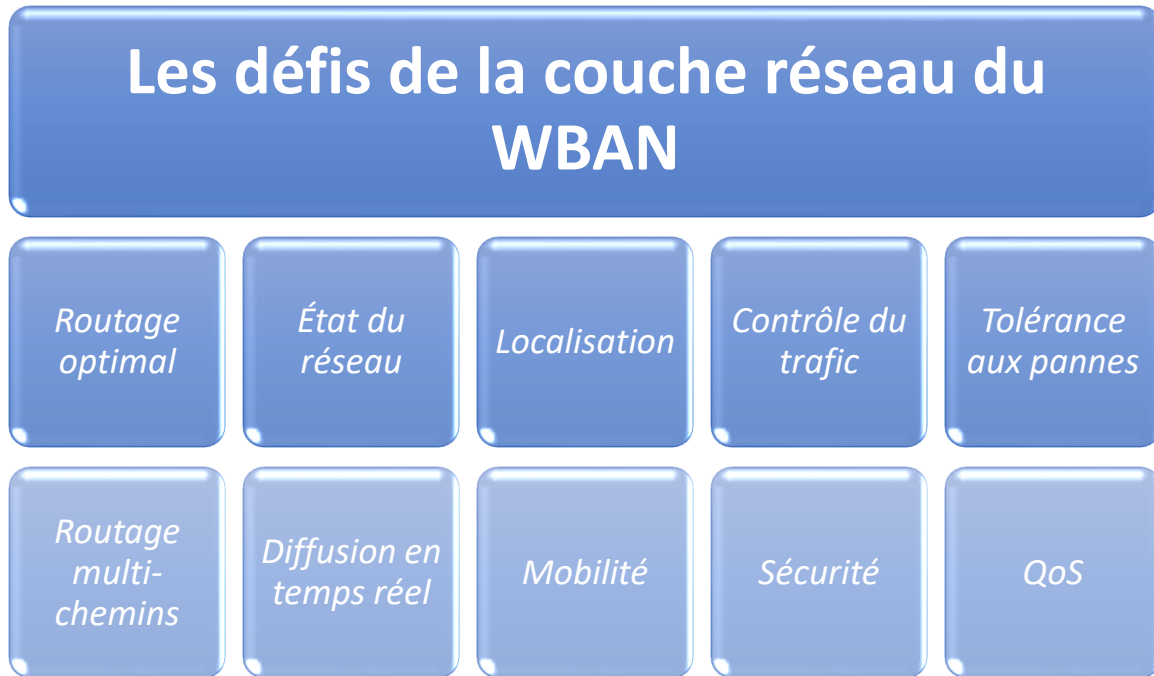


Figure II.3 Défis de la couche réseau

II.2.4- Couche transport

Comme la couche réseau, la couche de transport entre en jeu lorsqu'il y a des accès distants à un WBAN. La responsabilité de la couche transport dans les protocoles au-delà du BAN est de s'occuper du contrôle de la congestion, contrôle du flux, attribution équitable de la bande passante, fiabilité, récupération des paquets perdus, efficacité énergétique et support d'application hétérogène[23] [24]

Mais contrairement aux protocoles traditionnels de la couche transport tels que TCP et UDP : aucun adressage global n'est utilisé pour une communication de bout en bout. Au lieu de cela, la dénomination basée sur les attributs est pris en compte pour l'adressage des points terminaux [7] .

- Défis de la couche de transport WBAN

La conception des protocoles de la couche transport dépend fortement de l'application WBAN. De ce fait, les défis de conception et de mise en œuvre auxquels la couche transport doit faire face sont les suivants (Figure II.4) [25]:

- *Transport fiable* : en général, les protocoles de la couche transport sont chargés d'assurer une communication fiable. Dans WBAN, les données du capteur ou les événements doivent être transmis de manière fiable à l'extrémité de réception. De même, les opérations de gestion ou d'administration et les requêtes sur les capteurs doivent être transmises de manière fiable au nœud capteur cible pour le bon fonctionnement du WBAN.
- *Contrôle de la congestion* : l'inondation des données et la congestion des canaux entraînent une perte de paquets. Par conséquent, pour obtenir une communication fiable, un contrôle intelligent de congestion est nécessaire pour surveiller les canaux et réguler le débit de transmission de données de manière dynamique lorsqu'une congestion est détectée ou anticipée. Cela augmentera l'efficacité du réseau et conservera les ressources du réseau.
- *Auto-configuration* : la structure WBAN peut être modifiée pour diverses raisons telles que la mobilité des nœuds, la défaillance de nœuds, le déploiement aléatoire des nœuds, la mise hors tension temporaire, la variation spatiale des événements, etc. Les protocoles de la couche transport doivent pouvoir être dynamiquement adaptatifs à ces changements.
- *Appréciation de l'énergie* : ici aussi, les opérations telles que le contrôle d'erreurs et de la congestion dans la couche transport devraient également être économes en énergie. Le nœud émetteur doit être autorisé à conserver de l'énergie, le cas échéant, en contrôlant le débit de transmission des données ou en mettant le capteur en mode veille.
- *Implémentation inéquitable* : la plupart des fonctionnalités de la couche transport doivent être implémentées au niveau du puits (généralement le coordinateur WBANC ou le serveur WBAN) tandis que seules les parties minimales de base s'exécutent au niveau du capteur terminal. Cela sera utile pour économiser la consommation d'énergie des capteurs de faible puissance.
- *Adressage contraignant* : comme mentionné ci-dessus, les protocoles de la couche transport pour WBAN utilisent la dénomination basée sur les attributs et le routage à

concentration de données au lieu de l'adressage global de bout en bout. Cela nécessite de pratiquer différentes approches de la couche transport.

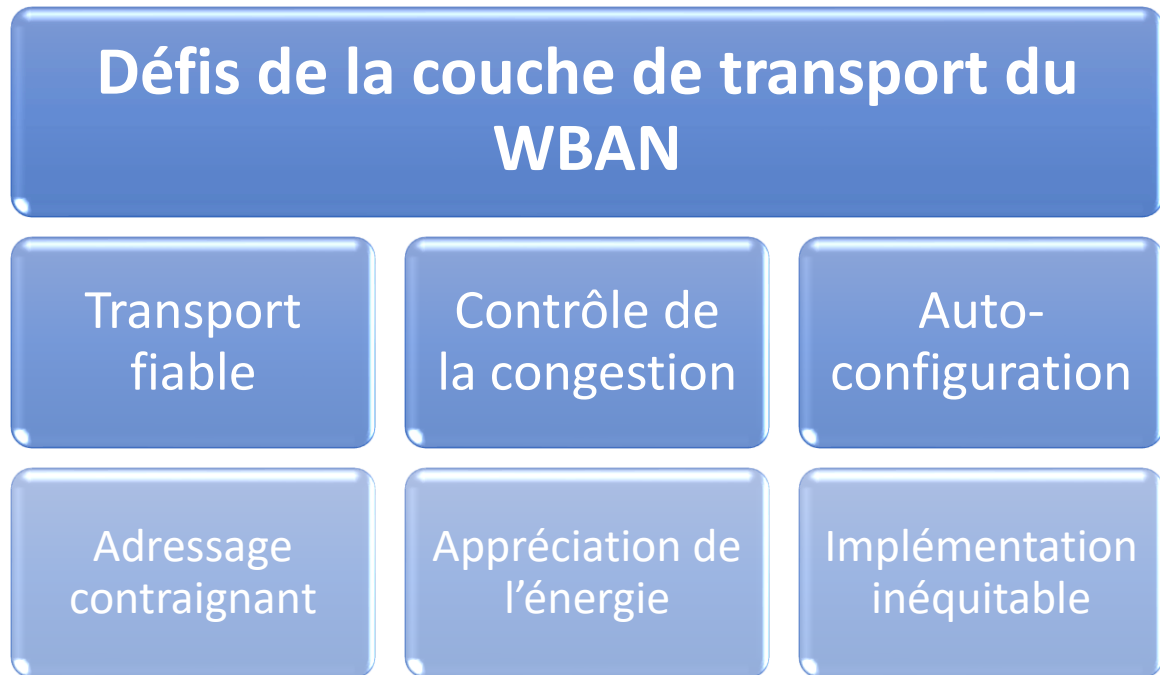


Figure II.4 Défis de la couche de transport du WBAN

II.2.5- Couche application

Cette couche fournit l'interface pour la gestion et la vérification des données WBAN. En outre, cette couche est également responsable de la localisation des nœuds et de la synchronisation temporelle[15]. La fonction la plus cruciale de la couche application est de garantir un environnement sécurisé pour accéder à distance aux données médicales sensibles. Pour assurer cet objectif, la couche d'application d'un WBAN typique peut être divisée comme suit [7]:

Protocole de gestion des capteurs (SMP : Sensor Management Protocol) : Il s'agit de l'interface par laquelle les administrateurs du système interagissent avec le WBAN. En utilisant le SMP, un administrateur de WBAN doit être capable d'effectuer les tâches suivantes [25]:

- Définir des règles pour la dénomination basée sur les attributs et l'agrégation des données.
- Accéder et vérifier l'état du capteur, configuration WBAN.
- Reconfigurer le WBAN, si nécessaire.

- Synchroniser les dispositifs de surveillance médicale.
- Déplacer ces dispositifs.
- Allumer et éteindre les appareils de surveillance selon les besoins.
- Appliquer l'authentification, la distribution des clés et la sécurité dans les communications au-delà de BAN.

Protocole d'attribution des tâches et de publicité des données (TADAP : Task Assignment and Data Advertisement Protocol) : En utilisant ce protocole, les utilisateurs expriment généralement leur intérêt, à propos d'un certain phénomène ou d'un événement, à un capteur particulier ou à un groupe de capteurs dans un WBAN ou l'ensemble WBAN. Alternativement, les appareils de surveillance médicale annoncent leurs données médicales correspondantes et les utilisateurs interrogent ces données en fonction de leurs intérêts.

Protocole d'interrogation des capteurs et de dispersion des données (SQDDP : Sensor Query and Data Dissemination Protocol) : Ce protocole permet aux utilisateurs d'émettre des requêtes basées sur la localisation et les attributs vers le WBAN dans son ensemble plutôt que vers un nœud particulier. Les utilisateurs peuvent également répondre aux requêtes des autres et peuvent collecter les réponses entrantes.

- Défis de la couche application WBAN

Le principal défi dans la conception de protocoles de la couche application pour WBAN est de fournir une interface efficace et rapide qui peut être utilisée par l'homme ou peut être interfacée avec d'autres appareils pour un diagnostic automatisé [15]. La couche application est également le premier niveau qui permet de faire respecter les mesures de sécurité. En outre, la plupart des fonctionnalités des protocoles de la couche transport chevauchent celles des protocoles de la couche application. Par exemple, des fonctions telles que le contrôle de la congestion, le contrôle de flux, l'allocation de bande passante, la récupération des paquets perdus, l'efficacité énergétique, etc. sont parfois également considérées comme faisant partie de la couche application [23].

II.3- Les attributs des systèmes WBAN

L'objectif premier de tout système WBAN est d'acquérir tous les types de données cruciales ou non des différentes parties du corps du patient et le système WBAN doit être

conçu de manière intelligente et avec une prudence précise pour faire face à un large éventail de défis en temps réel [26].

Les paramètres *fiabilité* et *latence* dans la transmission des données sont extrêmement importantes dans un système de surveillance des patients en temps réel. Ces paramètres dépendent de la couche physique et MAC du WBAN. La conception de ces couches détermine le profil de consommation d'énergie d'un capteur WBAN, ce qui est un problème de conception important. Le rôle de la couche MAC est de déterminer l'efficacité des opérations réseau et l'utilisation efficace des ressources. La couche physique doit être conçue de manière à gérer toutes sortes de problèmes de transmission pour transmettre les données du patient à distance sans aucun problème [15].

Les points suivants mettent en évidence les attributs d'un système WBAN typique :

- **Fiabilité** : La fiabilité d'un WBAN est directement liée à la probabilité de perte de paquets et au délai de transmission de ces derniers[27], ces deux paramètres sont influencés par le BER (Bit Error Rate) du canal et le processus de transmission de la couche MAC. La couche physique du WBAN doit être très efficace pour réduire le taux de BER par une modulation adaptative et les techniques de codage afin de s'adapter aux conditions typiques des canaux de transmission[15].
- **Efficacité énergétique** : La gestion de l'alimentation dans un WBAN est un problème opérationnel très important. En outre, l'efficacité énergétique d'un système WBAN est toujours fiable pour un suivi précis de la santé du patient. La consommation d'énergie peut être minimisée en optimisant les processus des couches PHY et MAC. La couche PHY peut augmenter la probabilité de succès des transmissions en sélectionnant des techniques de modulation et de codage appropriées. Une probabilité plus élevée de transmission de paquets réduit le délai de transmission de bout en bout ainsi que le bilan de puissance d'un nœud WBAN. La portée de l'optimisation de la puissance au niveau de la couche PHY est généralement limitée et fixe[27]

La couche MAC du système WBAN doit être suffisamment fiable en adoptant différents types de techniques écoénergétiques en termes d'ordonnancement des paquets et d'accès aux canaux afin qu'un débit élevé de transmission de paquets puisse être possible pendant des périodes prolongées[15].

- **L'évolutivité** : Les nœuds de capteurs WBAN, déployés sur le corps du patient, collectent des statistiques vitales comme des données physiologiques. Les systèmes WBAN doivent être suffisamment évolutifs pour permettre aux professionnels du WBAN de reconfigurer l'ensemble du système opérationnel WBAN en ajoutant ou en

supprimant des nœuds de capteurs sans aucun impact sur la fiabilité du système WBAN[15]. Cela dépend du protocole MAC. Un protocole MAC efficace permettra au futur système WBAN d'être prêt et évolutif.

En plus de la fiabilité, l'efficacité énergétique et l'évolutivité, les systèmes WBAN doivent être conçus en tenant compte de d'autres caractéristiques tels que [28] :

- Les systèmes WBAN doivent être équipés d'une capacité de tolérance aux pannes et d'auto-réparation pour assurer une transmission sûre et efficace des données provenant de capteurs portables et implantables vers des serveurs médicaux ou des sites web en ligne.
- Doivent être très efficaces pour fonctionner dans un environnement où la puissance est limitée et doivent se concentrer sur les capteurs implantables plutôt que sur les capteurs portables, car les capteurs implantables sont plus importants pour la santé des patients.
- Doivent prendre en charge la transmission de données de Kbps à Mbps pour transmettre une large gamme de données de signaux vitaux du corps d'un patient à des serveurs en ligne.
- Les systèmes WBAN doivent être suffisamment compétents pour être compatibles avec les paramètres QoS en termes de livraison fiable des données des nœuds de capteurs aux serveurs en ligne ou aux applications mobiles.
- Les systèmes WBAN devraient avoir une forte coordination avec d'autres nœuds réseau fonctionnant à différents spectres de fréquences et ayant différentes normes opérationnelles.
- Les données médicales doivent être sécurisées avec un moyen de cryptage si les données vont au-delà du réseau local.

II.4- Protocoles de communication WBAN

Le comité de normalisation IEEE 802 est considéré comme une organisation internationale dont la tâche principale est de proposer des normes internationales pour tout ce qui concerne les communications sans-fil. Plusieurs normes (dans la famille IEEE 802.15) ont été proposées pour différentes technologies de communication sans fil[15] . Par exemple, la

norme IEEE 802.15 (WG15 : Working Group15) se concentre particulièrement sur les réseaux personnels sans fil (WPAN) [29]. Le WG15 a proposé plusieurs normes sans fil différentes comme IEEE 802.15.1 (Bluetooth) ; IEEE 802.15.4 (PHY) pour les réseaux WPAN à faible débit appliqué au ZigBee ; IEEE 802.15.4a (PHY) pour la technologie à bande ultra-large ; IEEE 802.15.3c (High rate WPAN) ; IEEE 802.15.4d (WPAN Japonais) ; IEEE 802.15.4e (amélioration MAC pour IEEE 802.15.4), etc.

La norme IEEE 802.15.4 a été spécialement conçue pour les communications à faible portée pour les réseaux personnels sans fil (WPAN)[30] [31]. Les WBAN utilisent les normes WPAN pour communiquer les données collectées par les capteurs implantés dans le corps au serveur central pour le stockage et le traitement.

Un groupe de travail IEEE 802.15.6 a été formé pour normaliser les protocoles de communication WBAN pour les capteurs qui restent strictement à l'intérieur ou à la surface du corps humain et qui communiquent sur des distances plus courtes de l'ordre de quelques mètres [32]. Cette norme aborde plus spécifiquement le problème de la faible portée et des limites de la batterie des capteurs. Outre l'efficacité de la communication, la norme a également abordé les exigences de sécurité pour les WBAN en introduisant de nouveaux protocoles de la couche physique (PHY) et MAC pour les WBAN.

La communication passerelle-serveur utilise des technologies de communication longue portée telles que WiMax, LTE et LTE-Advance.

Nous allons détailler un certain nombre de technologies candidates à courte portée pour WBAN uniquement.

II.4.1- La norme IEEE 802.15.1 / Bluetooth

Initialement, la norme Bluetooth a été proposée pour transmettre la voix et les données. Elle est conçue pour des communications à courtes distances avec un débit de communication limitée. Ses caractéristiques ont retenu l'attention des développeurs de capteurs, Bluetooth est un bon choix pour être mis en œuvre dans un WBAN. Cependant, le protocole Bluetooth n'est pas le protocole le plus utilisé dans les réseaux de capteurs car il consomme beaucoup d'énergie et ne convient donc pas aux applications WBAN.

Bluetooth fonctionne dans 79 canaux de 1 MHz chacun, dans la bande de fréquences de 2,4 GHz et la gamme de fonctionnement typique est de 10 à 100 m. Cette technologie fonctionne comme une topologie en étoile, où un maître et sept esclaves forment le réseau. Le

nœud maître fournit des modèles d'horloge et de sauts de fréquence. Néanmoins, la limitation est, impliquant sept esclaves actifs seulement, ceci met un seuil sur le nombre maximum de nœuds à utiliser dans le réseau WBAN.

II.4.2- La norme Wibree (Ultra Low Power Bluetooth)

Comme son nom l'indique, Ultra Low Power Bluetooth est une version allégée de la norme Bluetooth, autrefois appelée *Wibree*, la plus efficace en énergie de Bluetooth, fonctionnant dans la bande de fréquence des 2,4 GHz, sans utiliser le saut de fréquences et elle supporte un débit de données de 1 Mbps. Afin de fournir une meilleure latence pour les applications WBAN cruciales, le BLE (Bluetooth Low Energy) a la capacité d'utiliser peu de canaux pour les couples de composants, et la synchronisation peut être effectuée en quelques millisecondes[16]. Cette norme prend en charge une topologie en étoile dans le réseau similaire au Bluetooth [33]. Afin de réduire la consommation d'énergie du Bluetooth, Wibree utilise une puissance de transmission et un débit symbole faible. La consommation d'énergie de Wibree est l'équivalent de 10% de celle d'une connexion par Bluetooth. Sa limite principale est la faible portée de communication : (5 - 10 m).

II.4.3- La norme IEEE 802.15.3 / UWB (Ultra Wide Band)

L'utilisation de la technologie UWB est intéressante dans le WBAN en raison de la faible puissance de transmission régulée, cette norme utilise des signaux radio envoyés avec une intensité très faible et des impulsions très courtes [34]. Elle fonctionne dans la bande de fréquence de 3,1GHz à 10,6 GHz. UWB est conçue pour remplacer la norme Bluetooth afin d'offrir plus de bande passante, moins d'interférences avec les autres technologies et un délai plus court. UWB est utilisée pour les transmissions à haut débit avec une consommation électrique proche de 400 mW. Cette technologie offre des avantages par rapport à Bluetooth. Elle consomme 50 fois moins d'énergie pour transmettre un bit par rapport à Bluetooth [7] [35], s'intéresse également à l'absorption de puissance par le tissu humain, et régule donc une faible puissance de transmission et un faible rapport cyclique de transmission.

L'inconvénient majeur de la technologie UWB est sa faible portée de communication (environ 10 m).

II.4.4- La norme IEEE 802.15.4 / Zigbee

ZigBee est une solution standardisée IEEE 802.15.4 pour les télécommunications sans fil conçue pour les capteurs et les commandes, et adaptée à une utilisation dans des conditions difficiles ou isolées [36]. ZigBee cible les applications de radiofréquence qui nécessitent un

faible débit de données, une longue durée de vie de la batterie, une proximité et une mise en réseau sécurisée [37]. ZigBee est une autre technologie très utilisée pour les applications WBAN. Cette norme prend en charge un débit de données variable allant de 20 Kbps à 250 Kbps. Elle fonctionne selon les continents sur 16 canaux dans la bande ISM (Industriel, scientifique et médical) de 2,4 GHz (250 Kbps), sur 10 canaux dans les bandes de 915 MHz (40 Kbps) et sur un canal dans les bandes de 868 MHz (20 Kbps) [38].

ZigBee fournit deux modes pour la procédure d'accès multiple, le premier mode c'est le mode balise : une structure de super trame utilise deux phases de fonctionnement nommées phases active et inactive. Pendant la phase inactive, les nœuds de capteurs restent en mode de faible puissance pour réduire la consommation d'énergie. La phase active se compose de deux parties : la CAP (Contention Access Phase) et la CFP (Contention Free Phase)[39].

Dans la CAP, les nœuds sont en concurrence pour obtenir l'accès à la transmission de données en utilisant un mécanisme de CSMA/CA avec slots dans la CFP, des intervalles de temps garantis (7 GTS : Guaranteed time slots) sont attribués à des nœuds spécifiques pour transmettre des données. Cela donne la possibilité de transmettre des données d'urgence pendant les créneaux GTS. Cependant, un nombre fixe de GTS n'est pas adapté au transfert de données d'urgence dans certaines applications WBAN[16].

L'un des avantages du protocole ZigBee est sa capacité à minimiser le temps de fonctionnement de la radio et à réduire la consommation d'énergie. Les appareils compatibles avec ZigBee peuvent être opérationnels pendant plusieurs années [40].

II.4.5- La norme IEEE 802.15.6

IEEE 802 a établi un groupe de travail nommé IEEE 802.15.6 dans le but de normalisation du WBAN afin d'établir un système de surveillance médicale en temps réel efficace. IEEE 802.15.6 [32] est la toute première norme qui définit exclusivement les niveaux inférieurs de communication WBAN. Le groupe de travail IEEE 802 a publié cette norme qui a pour but de régir les communications à l'intérieur et autour du corps humain [15].

L'objectif IEEE 802.15.6 est de fournir une norme internationale pour une communication sans fil ultra-basse puissance pour les nœuds dans/sur le corps afin de transmettre des données physiologiques au point d'accès, à courte portée, communication sans fil fiable, à la portée du corps humain et à un débit de données allant jusqu'à 10 Mbps pour un ensemble d'applications variées.

IEEE 802.15.6 définit également les spécifications de la couche physique et les spécifications de la couche MAC. Une description de la couche physique et MAC est donnée ci-dessous.

II.4.5.1- Spécifications de la couche PHY de l'IEEE 802.15.6

La norme définit trois couches PHY :

- **Couche PHY à bande étroite (NB : Narrowband)** : Le but de cette couche est de gérer la communication entre les capteurs sur et à l'intérieur du corps [41].

Elle a principalement trois responsabilités [32]:

- Activation / désactivation de l'émetteur-récepteur radio
- Effacer l'évaluation du canal (Clear Channel Assessment : CCA) dans le canal actuel
- Transmission et réception de données

Les bandes de travail de NB PHY comprennent les 400, 800, 900 MHz et les 2,3 et 2,4 GHz.

L'unité de données du protocole de la couche physique (PPDU-*The Physical Layer Protocol Data Unit*) se compose de trois parties :

-Protocole de convergence de la couche physique (PLCP-*Physical Layer Convergence Protocol*).

-L'en-tête PLCP.

-Unité de données du service de la couche physique (PSDU-*Physical Layer Service Data unit*), la figure II-5 illustre la structure de l'PSDU NB IEEE 802.15.6.

La transmission des paquets est effectuée de manière ordonnée. Le premier élément à transmettre est le préambule du PLCP, puis l'en-tête du PLCP et enfin le PSDU. Le PSDU est précédé du préambule et de l'en-tête du PLCP. Le préambule PLCP est utilisé au niveau du récepteur pour synchroniser le temps et la récupération de l'offset. L'en-tête PLCP est un émetteur avec un débit de données d'en-tête donné dans la fréquence de fonctionnement. L'unité PSDU se compose d'un en-tête MAC, d'un corps de trame MAC de longueur variable (0-256 octets) et d'une séquence de contrôle de trame. Un dispositif conforme au WBAN doit pouvoir prendre en charge la transmission et la réception dans au moins une des bandes de fréquences suivantes : 402-405 MHz, 420-450 MHz, 863-870 MHz, 902-928 MHz, 2360-2400 MHz, et 2400-2483,5 MHz. Les paramètres de modulation sont différents pour les

différentes bandes de fréquence de fonctionnement. Selon la norme, des techniques de modulation telles que la modulation par déplacement de phase binaire différentielle (DBPSK), la modulation par déplacement de phase en quadrature différentielle (DQPSK) et la modulation par déplacement de phase à 8 phases différentielle (D8PSK) sont utilisées dans le NB PHY. Toutefois, dans la bande 420-450 MHz, la technique de modulation par déplacement minimum gaussienne (GMSK) est utilisée [32].

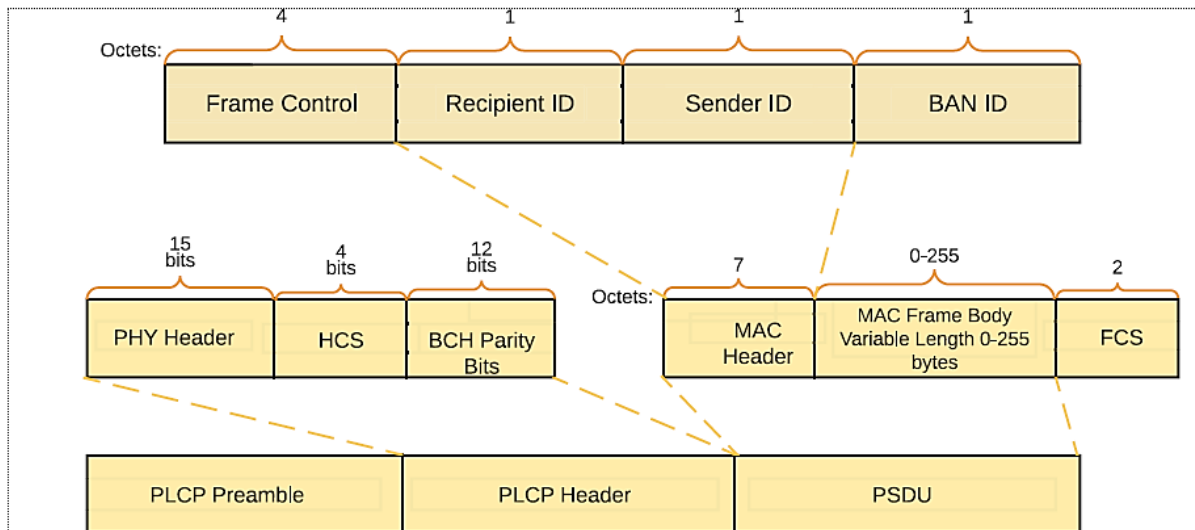


Figure II-5 Structure du PDU NB standard IEEE 802.15.6.

- **Couche PHY à bande ultra-large (UWB) :** Cette couche a pour but de fournir une communication WBAN efficace, économe en énergie et robuste. Elle utilise la fréquence de 3,11 à 1,2 GHz [42].

Selon la spécification IEEE 802.15.6, l'UWB PHY fonctionne selon deux modes :

- Le mode par défaut
- Mode QoS élevé

Le débit de données de l'UWB PHY varie de 0,5 Mbps jusqu'à 10 Mbps [15].

La bande haute et la bande basse sont les deux bandes de fréquences utilisées dans l'UWB PHY. Chacune des bandes est divisée en canaux de largeur de bande 499,3 MHz. La bande basse comprend trois canaux dont le canal 2 est considéré comme obligatoire avec la fréquence centrale de 3993,6 MHz. La bande haute comprend huit canaux, dont le septième est considéré comme obligatoire avec une fréquence centrale de 7987,2 MHz. Un composant WBAN doit être capable de prendre en charge au moins un des canaux obligatoires [32].

L'UWB PHY devrait être robuste lorsqu'il fonctionne dans les WBAN et donc être mis en œuvre à grande échelle. En outre, dans l'UWB PHY, les niveaux de puissance du signal sont

de l'ordre de ceux utilisés dans la bande MICS, qui offrent un niveau de puissance inoffensif pour le corps humain et une faible interférence avec les autres dispositifs. Parmi les autres fonctionnalités de l'UWB PHY, on peut citer :

- L'activation et la désactivation des émetteurs-récepteurs radio.

- Le PDU du UWB PHY est construit respectivement par l'en-tête de synchronisation (SHR), l'en-tête de couche physique (PHR) et l'unité de données de service de la couche physique (PSDU) (comme indiqué sur la figure II-6). Les bits du PDU sont convertis en signaux RF pour la transmission sur le support sans fil.

- L'UWB PHY peut fournir une indication sur le CCA au MAC afin de vérifier l'activité dans le support sans fil [16].

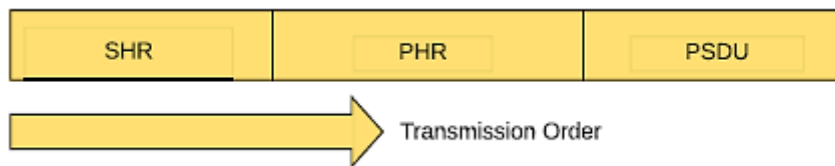


Figure II-6 Structure IEEE 802.15.6 UWB PDU.

- **Communication du corps humain (HBC- Human Body Communication) PHY** : HBC est la communication du champ électrostatique (EFC- Electrostatic Field Communication) équivalente à la spécification de la couche PHY qui est la base de la réalisation physique[15].

HBC PHY couvre l'ensemble des communications pour les BANs et il est responsable d'inter agir avec le protocole WBAN complet qui inclus la modulation, le préambule/délimiteur de trame de départ (SFD - Start Frame Delimiter), la structure des paquets, etc [16]. La structure du PDU comprend le préambule PLCP, le délimiteur de trame de départ (SFD), l'en-tête PLCP et le Payload (données utiles) PHY, comme le montre la figure II-7.

Le préambule et le SFD sont de taille fixe. Ils sont pré-générés et envoyé avant l'en-tête du paquet et du payload. Afin d'assurer la synchronisation des paquets, la séquence du préambule est transmise quatre fois alors que le SFD n'est envoyé qu'une fois. Une fois que le récepteur reçoit le paquet, il saisit le début du paquet en identifiant la séquence de préambule et ensuite il trouve le début de la trame en détectant le SFD [32].

Par ailleurs la spécification du matériel a été simplifiée pour une utilisation optimale dans le WBAN, par exemple, les émetteurs dans les nœuds de capteurs d'un système WBAN qui sont conformes à cette norme n'ont pas besoin d'antenne ; ils utilisent plutôt

un circuit simplifié qui consiste en une seule électrode [41]. De même, Le matériel du récepteur ne nécessite pas de modules RF, ce qui rend les dispositifs plus efficaces en termes de puissance et plus faciles à mettre en œuvre [15]. La fréquence de communication de la spécification est conforme dans la gamme de 1050 MHz.

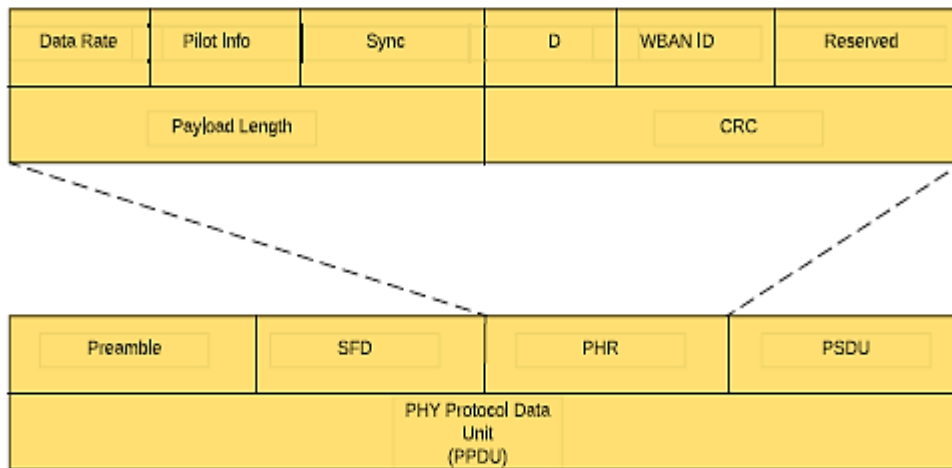


Figure II-7 Structure IEEE 802.15.6 HBC PDU

II.4.5.2- Spécifications de la couche MAC de l'IEEE 802.15.6

Pour fournir un accès aux canaux, le groupe de travail IEEE802.15.6 définit la couche MAC (Media Access Control) au-dessus de la couche PHY. Le coordinateur ou le hub divise l'ensemble du canal dans une structure supertrame, où des ressources référencées dans le temps sont allouées. Le hub choisit la période de balise de longueur égale aux supertrames liées. L'offset de la période de balise peut être décalé par le hub. Les balises sont transmises dans chaque période de balise de la supertrame active, sauf si certaines réglementations sur les bandes MICS l'interdisent [32].

Dans la spécification IEEE 802.15.6 pour le WBAN les données des patients ont été classées comme suit [15] :

- Type I : représente les données critiques pour la vie du patient.
- Type-II : représente les données de surveillance médicale normales et régulières.

La structure de la supertrame de l'IEEE 802.15.6 est divisée en quatre phases d'accès [43] :

- Phases d'accès exclusif (PAE - I & II) : Les EAP (*Exclusive Access Phases*) sont utilisés pour transférer des données de haute priorité ou d'urgence, c'est-à-dire des données de type I. Ils offrent un service de transfert de données garanti.

- Phases d'accès aléatoire (RAP - I & II) : Les RAP (*Random Access Phases*) sont utilisés pour le trafic non récurrent et sont réservés à la transmission de données de type II.
- Phase d'accès géré (MAP *Managed Access Phases*) : Cette phase est également utilisée pour le transfert de données de type I. Elle garantit un transfert de données de haute priorité.
- Phase d'accès au contenu (CAP *Contention Access Phases*) : Cette phase est également utilisée pour le trafic non récurrent et réservée aux données de type II.

Le réseau IEEE 802.15.6 fonctionne selon l'un des modes suivants [32] :

- Mode balise avec limites de super trame** : Le coordinateur d'un WBAN transmet des balises dans la région active des super trames. La balise est utilisée pour synchroniser les nœuds de communication dans un WBAN. Entre deux super trames actives, il peut y avoir plusieurs super trames inactives lorsqu'il n'y a pas de transmission programmée [43]. CSMA/CA ou Slotted Aloha est utilisé pour l'attribution des canaux dans ce mode.
- Mode sans balise avec limites de super trame** : Ici, les nœuds communicants n'ont pas besoin d'être synchronisés avec le coordinateur. Au lieu de définir les limites de la supertrame en utilisant des balises, le hub WBAN s'appuie sur des sondages [28] pour ordonnancer la transmission des données de chaque nœud capteur. Cela permet de s'assurer que la communication entre les capteurs s'inscrit dans la structure de la super trame [44]. La non nécessité de synchronisation permet d'économiser de l'énergie. Mais le problème est que le coordinateur ne peut pas transmettre les données directement aux nœuds capteurs du WBAN. Si un coordinateur veut communiquer avec un nœud, il doit envoyer un signal d'alerte d'activation au destinataire pour lancer la communication. Un autre problème sérieux est qu'à un moment donné, un seul type de données médicales est autorisé par slot (intervalle de temps). Et comme le coordinateur WBAN ne fonctionne que pendant la période MAP dans ce mode, cette politique d'exclusion pourrait ne pas être idéale pour les situations critiques de la vie d'un patient lorsque les médecins doivent accéder simultanément à différents signaux vitaux [45].
- Mode non-balise sans limites de super trame** : Dans ce mode, une structure de super trame prédéfinie n'est pas nécessaire. Cela signifie que la structure de la super trame n'a pas de slot prédéfini alloué à un nœud capteur pour la transmission de

données. L'attribution de slot se fait par des méthodes de contention ou post-contention. Le coordinateur opte pour le vote ou l'attribution par affichage pour la communication de données où un certain nombre de slots sont attribués ouvertement et donc accessibles à tout nœud capteur en attente de transmission de données. Ce mode de fonctionnement est conçu pour la transmission de données de type II. L'avantage de ce mode est qu'il évite l'interruption inutile par les capteurs médicaux qui détectent un état de santé moins critique dans le but d'acquérir les slots de communication requis par les capteurs utilisés pour la surveillance de la santé critique [45].

II.4.5.3- Exigences de la norme IEEE 802.15.6

Voici les principales exigences de la norme IEEE 802.15.6[15] :

- Les débits de liaison WBAN varient entre 10 Kbps et 10 Mbps.
- La suppression et l'ajout de nœuds doivent être effectués dans les 3s.
- Chaque système WBAN doit être capable de prendre en charge 256 nœuds.
- Chaque nœud de capteur doit avoir une communication fiable, en particulier lorsque le patient se déplace d'un endroit à un autre et effectue différents mouvements corporels comme s'asseoir, marcher, courir et toutes sortes de mouvements de bras ou de jambes.
- Le taux d'erreur sur les paquets (PER Packet Error Rate) doit être inférieur à 10%. Le taux de latence doit être inférieur à 125 ms dans les applications médicales et inférieure à 250 ms dans les applications non médicales.
- Des mécanismes d'économie d'énergie devraient être intégrés dans le WBAN pour les rendre pleinement opérationnels dans un environnement soumis à des contraintes de puissance.
- Le WBAN doit être entièrement équipé de la technologie UWB pour permettre la transmission dans toutes sortes d'environnements.
- Les meilleures fonctionnalités de QoS en termes de sécurité et d'auto-réparation devraient être présentes dans le WBAN.

Le nombre de couches de communication dépend du protocole / de la technologie utilisée pour la communication. Mais la couche physique (PHY) et la couche de contrôle d'accès au support (MAC) sont les deux plus importantes pour tout système WBAN. Par conséquent, le

groupe de travail IEEE oblige cette importance et a publié la spécification pour ces deux couches avec la norme IEEE 802.15.6.

II.5- MAC et routage dans les WBAN

II.5.1- MAC dans les WBAN

Contrairement au WSN, le WBAN est considéré comme un réseau de communication à courte portée en raison de l'espace de communication réduit et du nombre de nœuds limités où il n'y a pas besoin de sauts multiples ; et par conséquent, WBAN suit souvent une topologie en étoile [46]. D'un autre côté le phénomène d'évanouissement profond dû au réseau réduit et à très courte portée affecte le support de transmission qui devient très vulnérable. Cependant, les nœuds doivent toujours pouvoir accéder au support avec succès et leurs paquets de données doivent être reçus dans un délai raisonnable, dans le même ordre et de la même manière dont ils ont été envoyés sans le moindre pourcentage de perte de paquets. Pour ces raisons, la majorité - sinon la totalité - des défis du WBAN sont confondus à la fiabilité de la couche MAC, pour laquelle proposer des techniques MAC présente un certain nombre de lacunes uniques et rend la conception d'un WBAN fiable et économe en énergie en lui-même un défi. Ces observations nous motivent à aborder le WBAN du point de vue des perspectives de la couche MAC [47].

En général, les protocoles MAC sont regroupés en deux catégories [48]:

- **L'accès basé sur la contention**

Dans l'accès basé sur la contention, les nœuds sont en concurrence pour accéder au support, ce qui cause un encombrement des canaux et une collision de paquets, l'encombrement des canaux conduit à un débordement de tampon, ce qui augmente la perte de paquets [49]. La probabilité de la production de collisions est très élevée dans le WBAN car les données physiologiques sont corrélées. Par exemple, en cas d'urgence, un groupe de capteurs peut être impliqué dans la transmission, entraînant une collision et par conséquent une perte de paquets, ce qui peut être fatal même si chaque composant de WBAN fonctionne correctement, De plus, la retransmission des paquets cause la perte des paquets et la collision qui gaspille l'énergie[50] [51].

Le MAC basé sur la contention nécessite que les nœuds restent inactifs, et des recherches dans ce domaine ont révélé que l'écoute inactive consomme autant d'énergie que la transmission. Pendant l'écoute inactive, il est fort probable que certains nœuds reçoivent des paquets de données qui ne leur sont pas désignés. Ce phénomène s'appelle surentendre qui est un autre facteur de dissipation d'énergie [47]. L'encombrement des canaux, la collision de

paquets, l'écoute inactive, l'écoute et la dissipation d'énergie sont des raisons pour lesquelles les protocoles MAC basés sur la contention ne sont pas recommandés pour l'accès aux canaux WBAN [52].

- **L'accès sans contention**

L'étude de [52] révèle que les protocoles MAC d'accès sans contention permettent d'obtenir un WBAN plus fiable et plus économe en énergie que les protocoles MAC d'accès basé sur la contention.

Le MAC basé sur TDMA est l'un des mécanismes d'accès sans contention typiques qui est largement utilisé dans la littérature pour réaliser des réseaux sans fil fiables et écoénergétiques. De plus dans le MAC basé sur TDMA, les nœuds sont programmés pour accéder au support. Chaque nœud utilise le canal à un intervalle de temps spécifique et dort aux intervalles de temps des autres nœuds. Par conséquent, cette stratégie évite les inconvénients majeurs des algorithmes MAC basés sur la contention, qui sont la collision, l'écoute au repos et l'écoute. De plus, le trafic normal des applications médicales WBAN est généralement périodique, et les approches TDMA sont très appropriées pour ce type de trafic car les nœuds utilisent un accès au support à tour de rôle [47].

On pourrait soutenir que la complexité de la planification est l'un des inconvénients majeurs des algorithmes basés sur la TDMA pour un réseau évolutif [52]. Cependant, étant donné que le WBAN est un réseau à courte portée et non évolutif, la complexité de la planification n'est pas un problème.

Au niveau de la couche liaison de données, l'énergie peut être économisée grâce à des protocoles de contrôle d'accès au support intelligent qui visent à éteindre la radio lorsque la transmission ou la réception de paquets n'est pas prévue.

Plusieurs protocoles MAC de ce type ont été développés dans la littérature [[48], [53]] : tels que TDMA basé sur le préambule [54], Heartbeat Driven MAC (H-MAC) [55], Reservation-based Dynamic TDMA (DTDMA) [56], Distributed Queuing Body Area Network (DQBAN)[57], etc. En outre, plusieurs technologies telles que Bluetooth, en particulier Bluetooth Low Energy, Zigbee, IEEE 802.15.6, visent le WBAN [58].

H-MAC [55] est un nouveau protocole MAC basé sur TDMA qui vise à réduire la consommation d'énergie en exploitant les informations sur le rythme cardiaque pour effectuer la synchronisation du temps.

AR-MAC [59] : les auteurs ont proposé un protocole MAC pour les réseaux WBAN. Tout d'abord, ils ont proposé une formulation basée sur une programmation mathématique pour le positionnement des nœuds capteurs et des nœuds puit [44]. Ensuite, ils ont mis en œuvre leur protocole basé sur l'approche TDMA. Un problème commun à TDMA est le coût énergétique supplémentaire de la synchronisation périodique. Afin d'éviter les collisions, ils introduisent la DV (Drift Value) qui est calculée sur la base de l'heure d'arrivée prévue et de l'heure d'arrivée actuelle. La valeur de dérive est incorporée dans la réponse SYNC-ACK.

Dans [61], les auteurs proposent un protocole MAC pour l'application de télésurveillance EEG. Les auteurs élaborent un protocole basé sur TDMA dans lequel ils considèrent une architecture maître-esclave et tirent parti de la nature statique du réseau de zones corporelles. Dans l'architecture maître-esclave, ils définissent un nœud maître, une station de surveillance et un nœud capteur. L'idée de base est d'utiliser la station de surveillance pour coordonner le processus de synchronisation et transmettre les données collectées au nœud maître. Le principal inconvénient de ce protocole est qu'un nœud doit attendre N cycles avant de se resynchroniser[17].

II.5.2- Routage dans les WBAN

Les protocoles de routage peuvent être faits dans différentes catégories qui correspondent aux défis de routage du WBAN. Dans ce qui suit on donne un aperçu des protocoles existants, qui peuvent être classés comme des algorithmes de routage basés sur les clusters, les couches croisées, les mouvements posturaux, la qualité de service (QoS) et la prise en compte de la température [62].

II.5.2.1- Protocoles de routage basés sur les clusters

Dans les WSN comme dans les WBAN, la source d'énergie limitée est la principale contrainte à analyser. C'est pourquoi plusieurs systèmes efficaces basés sur des clusters sont proposés pour les deux réseaux afin de minimiser la consommation d'énergie et de maximiser la durée de vie du réseau[63].

En comparant la transmission indirecte hybride [64] à la collecte efficace en énergie dans les systèmes d'information des capteurs [65] et la hiérarchie de regroupement adaptative à faible consommation d'énergie (LEACH) [63], on constate que la consommation d'énergie est moindre si le nombre de nœuds est faible.

II.5.2.2- Protocoles de routage multicouches

Ces protocoles utilisent le concept de multicouche [66] qui est déjà abordé dans les WSN, où chaque couche (adjacente ou non) de la pile de protocoles partage ses informations, contrairement au modèle de couches strictes. Dans les WBAN, nous pouvons utiliser le concept de multicouche entre le réseau et les couches de contrôle d'accès au support (MAC) pour le routage et pouvons ainsi améliorer les performances globales du réseau.

II.5.2.3- Protocoles de routage basés sur les mouvements posturaux

Les mouvements posturaux du corps affectent la topologie du réseau existante, qui provoque la rupture de lien entre nœuds. Une fonction de coût qui fait la mise à jour périodiquement pour choisir la meilleure route pour acheminer les paquets vers le puits est introduite par les chercheurs.

II.5.2.4- Protocoles de routage compatibles aux qualités de service

Actuellement, il existe un certain nombre de divers protocoles de QoS disponibles dans les WSN, qui ne peut pas être implémenté dans les WBAN, mais il est possible si on prend en considération ses bordures uniques. Dans les WBAN, les différents types de données nécessitent une qualité de service différente [67]. Les protocoles proposés doivent donc tenir compte des différents types de mesures de QoS pour les différents types de données.

II.5.2.5- Protocoles de routage tenant compte de la température

Les absorptions et les interférences de rayonnement de l'antenne sont les principaux défis à prendre en compte lors de la conception d'un réseau de capteurs corporels, car les champs rayonnés provoquent une augmentation de la température des circuits des nœuds électroniques. Le champ de rayonnement a également un fort impact sur le corps humain [68] qui peut endommager les tissus humains en raison de son exposition continue. L'objectif de tous les protocoles tenant compte de la température est de réduire l'augmentation de la température des nœuds capteurs dans le corps en évitant le routage par des points chauds.

II.6- Conclusion

Préserver la durée de vie des capteurs est la principale préoccupation dans les WBAN. La communication entre capteurs est considérée comme le facteur principal en consommation d'énergie est peut-être optimisée sur les différentes couches de sa pile de communication.

WBANs sont supposés fonctionner correctement durant une longue période de temps sans aucune recharge de batterie ou remplacement spécialement pour les capteurs in-Body dits

aussi implémentés. Donc la gestion de l'énergie est l'une des préoccupations majeures pour la conception d'un protocole WBAN.

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'architecture réseau des WBANs avec ces différentes couches physique, liaison de données (MAC), réseau, transport et application ainsi que les défis qui doivent être pris en compte pour l'élaboration d'un WBAN. Tout en insistant sur le fait que les deux couches (MAC et PHY) sont conjointement responsables de l'amélioration des opérations WBAN en termes de consommation d'énergie, de fiabilité, d'efficacité du réseau, de latence, d'utilisation des ressources, coût d'exploitation, etc. Nous avons également exposé tous les attributs nécessaires pour la conception d'un bon réseau de capteurs du corps humains où les données transmises sont vitales surtout quand elles doivent être traitées en temps réel.

Nous avons, par la suite, passé en revue les différentes technologies à courte portée utilisées pour les WBANs dont la norme 802.15.6 spécialement conçu pour une surveillance médicale en temps réel, les spécifications des couches PHY et MAC de cette norme ainsi que ces exigences. Nous avons terminé par les algorithmes MAC et les algorithmes de routage du point de vue WBAN.

L'évaluation de ces protocoles sera discutée dans le chapitre suivant ainsi que les challenges et opportunités dans les WBAN.

CHAPITRE III

CHALLENGES ET FUTURE TENDANCE DES WBAN

III.1- Introduction

Les informations physiologiques recueillies des différents capteurs et actionneurs, placés sur le corps humain ou implantés, qu'elles soient critiques ou non, posent un défi majeur dans la conception de protocoles d'un réseau BAN, en particulier les protocoles de la couche MAC en termes d'adaptabilité, de flexibilité, de fiabilité, d'efficacité énergétique, etc.

La technologie WBAN a retenu, ces dernières années, l'attention de divers chercheurs qui ont réalisé des études liées aux différents défis dans ce réseau afin de trouver une solution optimale à chacun des défis majeurs. De plus d'autres technologies récentes ont été combinées à celles existante pour améliorer les performances du WBAN.

Dans ce chapitre nous commençons par présenter les limitations qui existent dans les architectures WBAN actuelles du point de vue réalisation, pour poursuivre avec les principaux défis et les points à relever dans les WBAN suite aux différentes études réalisées à ce jour. Nous continuons par la présentation des nouvelles technologies SDN, Blockchain et EH récemment introduites au réseau WBAN et les travaux qui peuvent être poursuivis dans ce sens.

III.2- Limitations des architectures WBAN actuelles

De nombreuses recherches ont été menées dans le but de résoudre les défis ordinaires rencontrés dans le WSN et communs au WBAN. Cependant, il reste encore des lacunes dans ces recherches dues aux limitations de l'architecture WBAN existante[16].

III.2.1- Dépendance des fabricants

L'un des principaux points négatifs de l'architecture actuelle est la dépendance vis-à-vis des fabricants fournisseurs. Les capteurs corporels vendus par les fournisseurs ne prennent en charge que les plateformes spécifiques aux fournisseurs eux même.

Par conséquent, un WBAN comprenant des capteurs de plusieurs fournisseurs est difficile à gérer et à exploiter car ils n'interagissent pas les uns avec les autres[69]. Cela crée des complexités de gestion et de fonctionnement et entraîne également le problème de reconfiguration du réseau.

Dans le cas de l'installation d'un nœud capteur de d'autres fournisseurs autres que celui qui existe déjà, cela peut provoquer un obstacle dans l'homogénéité du réseau, ce qui n'est pas souhaitable pour un réseau robuste.

III.2.2- Architecture dynamique du WBAN

La nature statique de l'architecture WBAN nécessite un long processus pour être mise à jour puisque l'application et l'infrastructure sont étroitement liées[70]. En outre, la mobilité est une question importante à traiter dans le WBAN, où les patients devraient pouvoir se déplacer tout le temps. En raison de cette mobilité, la perte de paquets et le taux d'erreur augmentent[71], ceci reste un problème difficile à résoudre efficacement dans l'architecture du WBAN.

III.2.3- Nécessité d'espace de stockage

En raison de la capacité de détection des événements normaux et anormaux, la vitesse de transmission des données des capteurs change brusquement. L'évolution du volume de données au fil du temps entraîne un déséquilibre de la charge de stockage et de traitement des données sur les serveurs terminaux (back-end). Une étude a été effectuée pour l'intégration de l'architecture actuelle du WBAN avec le cloud qui s'est avérée difficile et complexe tant sur le plan économique que technique[72].

III.2.4- Utilisation des ressources

L'architecture existante du WBAN ne parvient pas à utiliser les ressources de manière efficace. En raison de la logique de contrôle intégrée dans le matériel, l'utilisation des ressources ne peut pas être contrôlée dynamiquement[70]. Par conséquent, les capteurs finissent par transmettre des lectures inutiles même lorsque les données ne sont pas nécessaires. Le résultat est que cela entraîne un gaspillage inutile de bande passante et rend le système moins économe en énergie.

III.2.5- Sécurité des données

La sécurité et le respect de la vie privée sont des facteurs importants dans le cadre du WBAN puisqu'il s'agit des données de santé personnelles d'un patient. Le traitement de données volumineuses peut parfois être complexe et le système devient donc vulnérable à la cybercriminalité [73] [74].

Un système strict et évolutif reste une grande préoccupation pour les WBAN en termes de confidentialité des données, d'authenticité, d'intégrité et de gestion efficace du réseau [75].

III.3- Challenges et opportunités dans les WBAN

Les applications médicales d'un système de réseaux de capteurs sans fil (RCSF) imposent des exigences strictes en matière de fiabilité du système, de qualité de service, de

consommation d'énergie, de privatisation et de sécurité des données. La technologie des réseaux de capteurs médicaux WBAN est émergente ainsi elle fait face à une variété de défis durant la phase d'implémentation et de mise en œuvre. Les défis comprennent des défis techniques, éthiques et non techniques.

Pour que les WBAN deviennent présents partout et à prix raisonnable, un certain nombre de questions difficiles, telles que la normalisation, la conception du système, le coût, la compatibilité, la sécurité et la confidentialité doivent être réglées[76] [77]. Comme les applications WBAN ont diverses exigences de performances selon les différentes couches[78], plusieurs de ces exigences n'ont pas encore été prises en compte par la communauté des chercheurs et les défis doivent être relevés dans la vie quotidienne avant d'utiliser le WBAN.

Les points les plus difficiles concernant le WBAN sont détaillés dans cette section. Un large éventail de défis liés aux WBAN est examiné et des études faites dans ce sens sont étudiées.

III.3.1- Dispositifs hétérogènes et trafic

Le WBAN est de nature hétérogène. Différents types de capteurs et d'actionneurs sont présents dans le réseau. Par conséquent, les mesures et les types de données sont également différents. Certaines applications nécessitent des données en temps réel, tandis que d'autres se contentent de mesures périodiques. Il existe aussi des données prioritaires et non prioritaires[16].

Par conséquent, les différents types de données allant d'un contenu audio en temps réel à un contenu vidéo ou aux signaux continus, tels que l'ECG et l'EMG, doivent être pris en charge par WBAN.

Dans ce contexte les protocoles MAC pour le WBAN devraient jouer un rôle important. Les différentes activités, telles que le mouvement, la position du corps et les changements d'environnement, etc. conduisent à un soudain changement du contexte de la donnée.

Ainsi, la technique d'allocation dynamique des ressources devrait être prise en compte par le protocole MAC car le protocole MAC du WBAN basé sur l'allocation fixe des slots ne permet pas de répondre à la demande de trafic hétérogène et dynamique du WBAN[16].

Certaines études ont été faites pour traiter la sensibilité du contexte des données dans le WBAN. Pour les interventions d'urgence, une alarme est prise en compte dans [79] mais elle ne fonctionne que lorsqu'aucun autre nœud n'est prévu pour effectuer le transfert de données. L'utilisation d'un signal de réveil ou d'une radio de réveil est utilisée dans [80] pour faire basculer le nœud de l'état de veille à l'état actif. Cependant, l'ajout d'un circuit de réveil rend l'implémentation matérielle complexe et coûteuse.

Dans [81], une autre tentative a été effectuée pour prendre en charge la sensibilité du contexte des données dans le WBAN, qui manque elle aussi de la capacité de calcul pour analyser le contexte.

Un travail plus récent basé sur la simulation des protocoles MAC dans le WBAN [82] où il est suggéré d'utiliser des protocoles MAC hybrides en cas de données d'urgence. Mais même ce travail est un challenge en cas d'implémentation dans des applications hétérogènes.

Trafic WBAN : Les capteurs collectent et transmettent aux autorités concernées les informations personnelles des utilisateurs, ces informations peuvent être des données sensibles et critiques. Il existe différents types de trafic utilisés dans le WBAN [83] :

- Trafic à la demande : initié par le nœud puits vers les capteurs du corps. Le trafic à la demande est divisé en trafic continu et discontinu. Le trafic continu est utilisé en cas d'événement chirurgical tandis que le trafic discontinu est utilisé en cas d'information occasionnelle.
- Trafic d'urgence : imprévisible et initié par le capteur lorsqu'il y a une alerte, un événement anormal généralement détecté lorsqu'un seuil est dépassé.
- Trafic normal : utilisé pour l'entretien de la santé où les données recueillies par les capteurs de santé sont transmises au coordinateur pour être traitées ou transmises à une autorité compétente.

III.3.2- Efficacité énergétique

L'un des challenges majeurs dans la mise en œuvre du WBAN est l'efficacité énergétique. Comme les capteurs WBAN sont alimentés par une petite batterie, la durée de vie de la batterie est un élément essentiel à prendre en considération. Les dispositifs WBAN, qui sont de la catégorie des capteurs portables, sont faciles à remplacer. Alors que dans le cas de capteurs implantés, le remplacement de la batterie peut même nécessiter une opération chirurgicale majeure et donc coûteuse. La mise en œuvre d'un WBAN efficace sur le plan

énergétique pourrait être possible soit en améliorant la conception des couches PHY et MAC, soit par un système de sauts efficace (saut unique ou multi sauts) ou alors en ayant un cycle de travail adaptatif.

Dans [84] un protocole MAC basé sur le TDMA a été proposé pour un WBAN avec une architecture à plusieurs niveaux.

Cette proposition comprend des nœuds capteurs au premier niveau, un ensemble de nœuds maîtres au deuxième niveau et enfin, une station d'observation (gestion) au troisième niveau. Les nœuds maîtres collectent les données des nœuds capteurs et les transmettent à la station d'observation. La limite de cette proposition est qu'elle est basée sur un réseau stationnaire. Le défi demeure lorsqu'il y a un mouvement du patient et que, par conséquent, les distances entre les nœuds de capteurs et les nœuds maîtres varient. Par conséquent, les nœuds ajustent la puissance de transmission, ce qui rend le système moins efficace sur le plan énergétique. Les auteurs de [85] ont discuté l'efficacité énergétique basée sur un modèle de perte de trajets dérivé sur le corps humain. Il est démontré que la communication à saut unique dans les réseaux WBAN est inefficace puisque les nœuds sont situés loin du puits. Ici, la question de *Line of sight (LOS)* et de *non-Line of sight (NLOS)* existe également. Dans le cas d'un émetteur situé à l'arrière, alors que le récepteur est à l'avant, la perte de trajectoire est plus importante. Dans de tels cas, le WBAN multi-sauts est plus avantageux que celui à simple saut.

III.3.3- Défis de l'environnement

Les WBAN subissent des pertes de trajectoire pour de nombreuses raisons, telles que les mouvements posturaux du corps, la mobilité des nœuds, les obstacles environnementaux et l'absorption par les tissus corporels. En fait, il est possible de répondre à bon nombre de ces problèmes en créant des liens à sauts multiples et en installant des capteurs aux points importants. Toutefois, cela entraînera un changement dans les conditions de fonctionnement du réseau, ce qui provoquera des interférences et aura pour conséquence une réception des données de capteurs incomplète et sujette aux erreurs [86]. De plus, en raison des réglementations strictes en sciences médicales, la conception du WBAN est une question cruciale. Car, dans les capteurs implantés ou portables, la forme, la taille et le matériau de l'antenne doivent être conformes aux contraintes suivies par les établissements de la santé.

III.3.4- Sécurité, authentification et confidentialité

Il est indispensable de rendre les communications du WBAN très sûres pour préserver la confidentialité des données, ce qui signifie que les informations transmises à partir du WBAN ne doivent être accessibles qu'aux entités autorisées et confirmer l'authenticité des données entrantes[16]. L'écoute clandestine, les fausses alertes ou l'injection de données incorrectes peuvent avoir de graves conséquences, comme le décès d'un patient.

Par conséquent, la sécurité des WBAN doit être assurée à différents niveaux, par exemple au niveau physique, MAC et réseau[87]. Toutefois, l'implémentation de mesures de sécurité entraîne des frais généraux supplémentaires et rend le système moins efficace sur le plan énergétique. C'est pourquoi, dans [88], un programme de sécurité léger basé sur la sécurité est proposé pour les WBAN, où une technique biométrique légère est utilisée pour authentifier les messages dans les WBAN.

Dans une technique biométrique légère, un programme d'accord de clé permet le partage des clés entre les nœuds du WBAN avec des frais généraux réduits. Cette analyse s'avère efficace sur le plan énergétique.

Différentes méthodes d'authentification, telles que les visages humains, les caractéristiques des mains et les signaux EEG, sont utilisées dans les réseaux WBAN et des améliorations continues sont apportées dessus dans les universités et l'industrie.

Une manière idéale de fournir l'authentification est d'utiliser des caractéristiques distinctes du corps humain. C'est une tâche complexe et difficile lorsque les patients connectés à un WBAN se trouvent à proximité d'un autre WBAN. Il est donc important d'identifier à quel réseau un patient appartient.

Dans[89], les auteurs ont abordé la question de l'identification des nœuds du point de vue biométrique. Selon [90], la sécurité dans les WBAN pourrait être améliorée en établissant la confiance entre les nœuds du réseau. Un protocole de gestion de la confiance, léger et résistant aux attaques, est proposé dans[91]. Selon cette proposition les résultats expérimentaux de ce document ont prouvé que la performance du réseau améliore et protège le réseau contre les comportements malveillants.

III.3.5- Bio-compatibilité

Dans le contexte des applications WSN, la bio-compatibilité n'est pas un problème important. Cependant, pour les applications WBAN, en particulier dans le cas des capteurs implantés, la biocompatibilité est une question importante à traiter.

En raison des capteurs implantés sous la peau ou toute autre partie du corps, les tissus corporels présentent une réaction, qui est connue sous le nom d'encrassement biologique (bio-fouling), qui fait référence à l'accumulation de protéines, de cellules et d'autres biomatériaux indésirables à la surface du corps [16]. Le bio-encrassement pourrait être à l'origine de la dégradation du courant des capteurs et donc de leur défaillance[92].

L'atténuation des effets de l'encrassement biologique à l'aide de neuf capteurs a été examinée dans [93]. Une autre analyse liée à la biocompatibilité, a été examinée dans[94], qui identifie deux facteurs de réaction de l'organisme, par exemple, la perturbation mécanique et chimique. La perturbation mécanique peut entraîner une distorsion des tissus et une occlusion des vaisseaux sanguins. Une forme arrondie non tranchante des capteurs pourrait être utilisée pour réduire la distorsion des tissus.

III.3.6- Qualité de service (QoS)

La qualité de service (QoS) est un point important dans le WBAN et elle est différente des applications WSN. La qualité de service dans le WSN ne peut pas être directement impliquée dans le WBAN puisqu'elle dépend de la sensibilité des applications et de la nature des données transportées.

Par conséquent, selon les applications, la qualité de service QoS est différente dans les réseaux WBAN. Pour les patients en état critique, les systèmes de surveillance exigent la transmission instantanée des données, sinon, les retards entraînent des situations catastrophiques[95].

Selon les auteurs de[96], il est difficile de définir la qualité de service pour un système de santé distribué (décentralisé) en raison de la nature imprévisible de l'environnement WBAN. Traditionnellement, la QoS comprend la latence, la puissance de transmission, la fiabilité et la réservation de la bande passante.

Selon[96], pour prendre en charge la QoS dans le WBAN, les facteurs suivants doivent être pris en considération[16] :

- Limitations des ressources : Les ressources telles que la puissance de la batterie, la bande passante disponible, la puissance de transmission, la taille de la mémoire tampon et la capacité de traitement sont des contraintes importantes pour toute application du nœud capteur. La QoS traditionnelle du routage et des protocoles MAC n'est pas appropriée pour le WBAN.

- Trafic imprévisible et hétérogène : Dans les applications WSN, il y a généralement un trafic périodique il est donc facile de définir la QoS pour de telles applications. Cependant, le WBAN connaît différents niveaux de trafic tels que l'absence totale de trafic, rafale de données et parfois des charges de trafic différentes en raison des différents types d'applications dans le WBAN. Ce trafic hétérogène rend le support et les exigences de QoS plus complexes et plus difficiles.

- Instabilité et dynamique du réseau : Le WBAN peut contenir à la fois des nœuds fixes et des nœuds mobiles. De plus, certains nœuds peuvent être en état actif alors que d'autres peuvent rester inactifs pendant un certain temps. En outre, les ruptures de liens et les problèmes de puissance sont très fréquents dans les réseaux WBAN et, par conséquent, un réseau stable peut souvent devenir instable. Le routage et l'accès au support de transmission deviennent difficiles dans des conditions aussi instables.

- Bilan énergétique : La gestion des sources d'énergie est très importante et la charge énergétique doit être répartie uniformément entre tous les nœuds capteurs et dispositifs.

- Redondance des données : Il est important d'éviter la redondance des données et donc d'économiser l'énergie. Les techniques permettant d'éviter les données redondantes pourraient être l'agrégation de données, mais cela complique la conception du réseau, surtout lorsque l'on sait que toutes les données n'ont pas la même importance. Par conséquent, il devrait y avoir un mécanisme de QoS pour que les données d'urgence soient prioritaires.

Selon[97], trois éléments pourraient être utilisés pour satisfaire la QoS dans le WBAN. Il s'agit des éléments suivants :

- Une architecture asymétrique, dans laquelle la plupart des traitements sont effectués sur le nœud central,
- Un MAC virtuel qui lui permet d'organiser les ressources sans fil indépendamment du protocole MAC utilisé,
- Un organisateur de ressources adaptatif qui gère la bande passante restante pour satisfaire les exigences de la qualité de service en cas de défaillance du canal due à des interférences RF causés par le mouvement du patient.

III.3.7- Conception matérielle

Une des tâches importantes est de désigner le matériel approprié pour le WBAN. Plus précisément, le choix du nœud capteur, qui peut être attaché ou implanté dans le corps. Par conséquent, la conception du nœud doit être conforme à la nature des tissus du corps humain.

De plus, la conception de l'antenne est très importante, car dans le cas d'une antenne implantée cela dépend de l'emplacement et de l'organe concerné, ce qui impose une restriction pour le concepteur. La taille, le matériau et la forme de l'antenne doivent être compatibles avec les tissus humains et l'environnement RF.

Les défis de la conception d'une antenne, tels que le gain d'antenne, la polarisation, la sensibilité et la capacité de connexion avec un point d'accès dont la position n'est pas sur la ligne de (NLOS) sont très importants[16].

III.3.8- Règles d'engagement

Définir des règles d'engagement ou, en d'autres termes, créer un WBAN qui répondrait aux exigences des patients, est un défi. Selon[98], trois points doivent être pris en compte lors de la création d'un WBAN :

- L'environnement dans lequel les nœuds WBAN peuvent fonctionner.
- Quels sont les éléments autorisés à coopérer entre eux et ceux qui ne le sont pas.
- Comment l'information provenant d'un élément peut être utilisée.

Une fois le WBAN créé, les équipements doivent pouvoir échanger des données, négocier des paramètres de sécurité, effectuer l'échantillonnage de données, associer des nœuds, retirer des capteurs, et changer le mode de fonctionnement du capteur, etc. Toute modification dans le réseau doit être enregistrée et partagée entre les autres éléments associés. D'un autre côté, les registres locaux des éléments devraient être mis à jour dès qu'un changement survient.

III.3.9- Overheating

La surchauffe des capteurs est un facteur crucial puisque les capteurs WBAN sont parfois fixés directement sur la peau humaine. Habituellement, la surchauffe provient du rayonnement de l'antenne pendant la transmission de données. Cela peut causer des dommages aux tissus corporels humains sensibles à la chaleur [99] [100].

En outre, les protocoles de routage utilisés dans les réseaux WBAN jouent un rôle primordial dans l'augmentation de la température des capteurs qui provoque en fin de compte une gêne et des dommages aux tissus. Par conséquent, le problème de surchauffe doit être gardé à l'esprit lors de la conception des protocoles de routage [101].

Les radiations électriques et électromagnétiques provoquent une augmentation de la température des capteurs, ce qui amène les tissus à absorber une partie de la température. L'effet d'augmentation de la température et du rapport d'absorption spécifique est traité dans [102].

III.4- Les futures tendances

Les chercheurs ont continuellement essayé de trouver une solution optimale aux défis du WBAN (cités dans la partie précédente) soit en modifiant les solutions existantes, soit en intégrant de nouvelles technologies.

Pour relever les défis du WBAN, deux technologies récentes et attrayantes sont utilisées :

- *Software Defined Networking* (SDN) qui a le sens de « Réseau défini par logiciel »
- *Blockchain* ou chaîne de blocs.

SDN et Blockchain, tous deux apportent des changements révolutionnaires en offrant des perspectives fructueuses dans le domaine d'applications de l'Internet des objets IoT (Internet of Things), en particulier dans le WBAN[16].

D'une part, un système de contrôle à programmation centralisée du SDN résout les difficultés liées à la gestion et les dépendances du fournisseur, et d'autre part les enregistrements distribués décentralisés de la chaîne de blocs créent une plateforme de partage de données efficace et sécurisée.

La récolte d'énergie (EH : Energy Harvesting) est une autre technologie prometteuse avec des sources d'énergie auto durable pour le WBAN[16].

Dans ce qui suit, nous mettons en évidence les avantages et les défis de l'intégration des technologies SDN, Blockchain et EH dans WBAN.

III.4.1- WBAN basé sur le SDN

Ces dernières années, le réseau défini par logiciel (SDN) a reçu une attention importante de la part de l'industrie et des universités. Le SDN est un nouveau modèle de mise en réseau basé sur la séparation du plan de contrôle du plan de données. Le découplage de ces deux plans permet aux opérateurs de travailler avec un programme de contrôle de réseau centralisé au lieu de plusieurs dispositifs de réseau, provenant aussi de multiples fournisseurs, pour implémenter leurs politiques favorites[103].

Le plan de contrôle est un contrôleur basé sur un logiciel où les éléments du réseau deviennent un simple dispositif de transmission de paquets (le plan de données) qui peut être programmé via une interface libre et un protocole réseau libre (*OpenFlow*).

Dans le SDN, le contrôleur machine crée des règles de transfert de paquets pour tout changement de topologie du réseau, toute connexion initiée par les récepteurs finaux, tout changement dans la charge du trafic ou tout message provenant de d'autres contrôleurs. Le contrôleur dirige ces règles vers des commutateurs programmables où les fonctionnalités nécessaires sont implémentées[16]. Cette caractéristique du SDN permet de faciliter le déploiement de nouveaux protocoles et applications.

Le concept théorique du SDN devrait réduire la complexité de la gestion des réseaux, qu'ils soient câblés ou sans fil. Quand il s'agit d'implémenter le SDN dans le WBAN, il offre une flexibilité et un contrôle programmé sur le réseau. Parmi les autres avantages, les plus importants, du SDN,

- la réservation de la bande passante pour les applications sensibles au délai [70] ,
- la technique sécurisée de surveillance des patients par la poursuite de leur localisation[104],
- l'attribution efficace et sécurisée des données [75],
- l'utilisation d'un algorithme de routage centralisé pour faciliter la mobilité [105],
- la mise à jour du tableau de routage [106],
- l'activation et désactivation dynamiques des capteurs[70] pour favoriser l'efficacité énergétique.

Pour tirer parti des avantages potentiels du SDN dans le WBAN, une architecture WBAN basée sur le SDN est proposée dans[107]. Cependant, l'intégration du SDN dans le WBAN peut rencontrer quelques défis. Certains défis sont présentés ci-dessous [16] .

- **Défis inévitables du WBAN** : de nombreux défis du WBAN ne sont pas encore correctement traités. Bien que le SDN indique des perspectives prometteuses pour résoudre bon nombre des défis actuels du WBAN. En particulier, le modèle SDN promet une énorme réduction de la consommation d'énergie par nœud. Cependant, l'importance de cette affirmation doit être évaluée et quantifiée.
 - Pour cela, la quantité de traitement nécessaire proportionnelle à la consommation d'énergie doit être déterminée, ainsi que la consommation d'énergie liée à l'application.
 - Les données captées agrégées sont également primordiales et nécessitent une recherche plus approfondie.
 - Le WBAN traite des applications hétérogènes, par conséquent, l'agrégation de données à partir de l'application hétérogène est également critique. Ce problème d'agrégation dans un réseau WBAN hétérogène doit être exploré.
 - La transmission des données est également une préoccupation majeure. Il n'est pas pratique d'avoir tous les capteurs qui transmettent leurs données au contrôleur, car cela entraînera un retard excessif et une congestion du réseau. Dans la conception, des contrôleurs locaux ou des nœuds puits pourraient être utilisés. Cependant, cela doit être testé pour évaluer son efficacité.

III.4.1.1- Implémentation et évaluation

L'idée d'avoir le SDN dans les WBAN est très récente. Cependant, de nombreux chercheurs proposent SDN pour WBAN pour fournir des services de sécurité et d'authentification. Reste encore la simulation et la mise en œuvre pratique qui doivent être faits. Certaines implémentations ont réussi à appliquer la norme OpenFlow dans les nœuds capteur et à s'en servir comme commutateur SDN compatible pour la communication entre le plan de données et le contrôleur.

Dans tous les cas, une implémentation pratique est nécessaire pour donner une indication claire des progrès accomplis jusqu'à présent. Cela donnerait également l'occasion d'évaluer les problèmes tels que la qualité de service QoS, la fiabilité, la perte de paquets, la bande passante, la stabilité, l'efficacité et l'évolutivité.

III.4.1.2- Communications inter et intra-plan

La communication entre le plan de contrôle et le plan d'application est importante pour la sécurité de la structure globale du réseau. Par conséquent, tout protocole considéré doit répondre de manière adéquate aux problèmes de sécurité. D'autre part, la communication entre le contrôleur et les éléments de l'infrastructure, fonction principale du Southbound API, est aussi particulièrement importante car c'est elle qui permet la transition du plan de contrôle à ressources élevées au plan de données à faibles ressources.

Cette transition présente un problème qui peut être un axe de recherche à explorer.

III.4.1.3- Standardisation

Il n'y a pas de protocole standardisé disponible pour le SDN appliqué au WBAN (SDWBAN). Des chercheurs à travers le monde sont entrain de proposer plusieurs plateformes générales. Cependant, l'absence de norme pourrait faire dérailler le développement et aggraver encore plus le problème de la compatibilité dépendante, que le modèle SDN cherche à éviter.

Par conséquent, il y a un besoin urgent de normalisation du SDWBAN. Le manque de normalisation entraînerait des architectures différentes incohérentes et incompatibles qui pourraient violer le principe d'hétérogénéité du SDN.

III.4.1.4- Système de contrôle distribué

Afin de fournir l'évolutivité, la fiabilité et performances dans le SDWBAN, un système de contrôle distribué efficace est nécessaire. Des solutions de contrôle distribué ont été proposées pour les réseaux d'entreprise SDN et les solutions de réseau intelligent basées sur le SDN. Mais il n'y en a pas pour SDWBAN. Cela nécessite le besoin d'étudier un nouveau système de contrôle distribué pour SDWBAN sans compromettre l'essentiel de la qualité.

III.4.2- Technologie Blockchain pour le WBAN

La technologie Blockchain a elle aussi attiré l'attention des chercheurs ces dernières années. En particulier, les services médicaux ont commencé à utiliser ce concept pour maintenir la sécurité et la confidentialité. Le WBAN dans les applications médicales a pu tirer profit en utilisant le concept de Blockchain. Plus spécialement, le système de gestion peut être pris en charge lorsque différentes parties telles que les médecins généralistes, les médecins

spécialistes, les thérapeutes et les hôpitaux ont besoin d'accéder aux mêmes informations[108].

Les capteurs WBAN portables génèrent un volume considérable de données qui sont importantes pour le processus de diagnostic et également une ressource utile pour la recherche médicale. Le stockage et le partage des données personnelles est une tâche importante.

Pour faciliter le stockage sécurisé des données, une startup basée en Suisse a inventé the Healthbank Blockchain (Banque de santé Blockchain) qui offre une plateforme de données individualisées pour partager les données personnelles à des fins de recherche et ces données partagées peuvent même être suivies avec un horodatage (*timestamp*) [109].

L'une des dernières études [110] a introduit BloCHIE (*Blockchain-based platform for Healthcare Information Exchange*), une plateforme basée sur la blockchain pour l'échange d'informations médicales afin de stocker à distance une quantité énorme de données qui renforcera les collaborations entre les entreprises de recherche clinique.

Bien que les perspectives de la blockchain pour WBAN semblent attrayantes, elle comporte une variété de défis. Certains des défis cruciaux de l'intégration de la blockchain ont été cités dans[111].

Nous discutons brièvement certains aspects cruciaux de l'intégration de la blockchain dans le WBAN[16].

- **Confiance et accord mutuels** : il est important d'avoir une confiance entre les parties participantes telles que, patients, assureur médical, équipe de recherche médicale, et les prestataires médicaux. L'autorisation de partager et de consulter les renseignements personnels du patient est indispensable pour poursuivre la recherche sur une maladie spécifique
- **Gestion du trafic** : la nature variée du trafic WBAN exige un mécanisme de priorité exclusif pour traiter les données de surveillance normales et les données d'urgence. Les données d'urgences doivent être adressées avec la priorité la plus élevée afin qu'elles subissent le minimum de retard.
- **QoS** : comme le WBAN nécessite la livraison de données dans un délai strict conformément aux applications spécifiques, lorsque la vérification de bloc a lieu par les manageurs, cela constitue un retard supplémentaire. Et à mesure que le nombre de patients augmente, la complexité et la charge de calcul augmentent, ce qui affecte finalement la qualité de service globale du réseau.

- **Contrôleur de données** : l'une des propriétés de la Blockchain est l'invariabilité, ce qui signifie la résistance à la modification des données. Les dysfonctionnements des éléments dans le WBAN peuvent entraîner l'enregistrement erroné de données dans le EHR (*Electronic Health Record*) qui consiste en un dossier de santé électronique (DES). Étant donné que la modification des données n'est pas possible dans la Blockchain, trouver un contrôleur de données pour faire face aux données erronées est très difficile et reste à résoudre.
- **Contrats intelligents** : générer des clauses auto-exécutables pour des contrats intelligents pour différentes applications WBAN est très difficile. Parce que le modèle du contrat intelligent doit être représentable et quantifiable.

III.4.3- Récolte d'énergie dans le WBAN

La récolte d'énergie (*Energy Harvesting : EH*) est maintenant considérée comme un mécanisme de premier ordre pour augmenter l'efficacité énergétique des mini capteurs du WBAN. EH fait référence à la collecte d'énergie à partir de sources ambiantes illimitées et à la conversion de cette puissance en une énergie électrique opérationnelle[112].

L'énergie électrique peut être utilisée pour faire fonctionner les capteurs WBAN quand c'est nécessaire. Il peut y avoir plusieurs sources d'EH tout autour de nous, y compris le corps humain.

Nous discutons brièvement les différentes techniques EH pour WBAN qui sont en cours de la recherche et étude [16].

III.4.3.1- Récolte d'énergie photovoltaïque (*PVEH : PhotoVoltaic Energy Harvesting*)

Le mécanisme de PVEH fonctionne sur la base de la lumière du soleil reçue ou des lumières provenant de toute autre source, qui sont absorbées dans les cellules faites de matériaux semi-conducteurs. La lumière absorbée génère des électrons à travers l'effet de la jonction PN. Ainsi, à partir des électrons générés, une différence de potentielle est créée[113]. Le courant continu en sortie (*DC Direct Current*) de la cellule photovoltaïque peut être emmagasiné et utilisé pour les capteurs WBAN.

III.4.3.2- Récolte d'énergie piézoélectrique (*PEH : Piezoelectric Energy Harvesting*)

Les sources d'énergie biomécaniques telles que l'énergie cinétique reçue de divers mouvements internes et externes du corps humain fonctionnent en tant qu'entrées du PEH. Les sources biomécaniques telles que le rythme cardiaque, la pression artérielle, la

locomotion, la respiration, les bruits de pas, les mouvements des bras, etc. peut être récupéré à l'aide de divers générateurs piézoélectriques et mécaniques[112].

III.4.3.3- Récolte d'énergie thermoélectrique (TEH : Thermoelectric Energy Harvesting)

Cette méthode extrait l'énergie à partir des différences de température créées par le corps humain en utilisant un générateur thermoélectrique. De nos jours, cette méthode gagne en popularité pour les applications WBAN car le corps humain est capable de créer une différence de température entre des surfaces chaude et froide d'un générateur thermoélectrique. Cette différence de température conséquente peut être convertie en énergie électrique [114].

III.4.3.4- Récolte d'énergie RF (RFEH : RF Energy Harvesting)

En raison de l'utilisation accrue des technologies de radiofréquence (RF), il existe une abondance de sources RF qui peuvent être utilisées comme entrée pour RFEH et alimenter ainsi les capteurs WBAN [115]. Un circuit de conversion de puissance est utilisé pour convertir les rayonnements RF disponibles en énergie électrique.

L'efficacité de ce processus dépend de la disponibilité des sources RF et de l'emplacement.

- Défis liés à la technologie EH

Bien que diverses technologies EH offrent des perspectives avantageuses pour améliorer l'efficacité énergétique des capteurs WBAN, la mise en œuvre de la technologie EH doit relever quelques défis. Nous mettons en évidence dans ce qui suit les problèmes et défis liés à l'intégration de la technologie EH dans le WBAN.

- Allocation de puissance :

Comme la technologie EH prend en charge un moyen qui fournit de l'énergie électrique récupéré vers les capteurs WBAN, il est crucial de mesurer la probabilité de panne dans le scénario de mise en œuvre. Par conséquent, des recherches approfondies doivent être menées dans un environnement de simulation pour diverses applications WBAN avec des canaux d'évanouissement. En outre, une gestion efficace de la puissance entre divers modules, comme l'utilisation d'énergie supplémentaire, la collecte optimale de données, les décisions de routage et le fait d'éviter la surcharge sont importants [112].

Par conséquent, de nombreux travaux de recherche devraient porter sur les problèmes d'allocation de puissance pour garantir les exigences de QoS selon le protocole et l'application utilisés.

- **Disponibilité des sources :**

Pour permettre l'effet de l'EH, il est très important d'évaluer la possibilité de réalisation des sources disponibles pour un mécanisme EH particulier. Par exemple, les sources ambiantes telles que la lumière du soleil ou les radiations RF peuvent ne pas être toujours disponibles ou être limitées. Pour illustrer, les cellules photovoltaïques nécessitent un contact direct de la lumière du soleil ou dans le cas du rayonnement RF, la proximité de la source émettrice de rayonnement joue un rôle essentiel dans la production d'énergie électrique.

Par conséquent, avant la mise en œuvre de l'EH, le degré de disponibilité des sources doit être évalué.

- **Complexités de conception :**

La conception physique des capteurs WBAN devient plus difficile lors de l'implémentation de la technologie EH pour l'efficacité énergétique. Des fonctionnalités supplémentaires rendront la conception du capteur difficile car des circuits complexes doivent être intégrés dans le matériel. L'intégration se traduit par la taille et les coûts de mise en œuvre.

Ainsi, le niveau d'intégration de la technologie EH est un paramètre critique à prendre en considération pour es diverses applications WBAN.

III.5- Conclusion

WBAN est un domaine de recherche émergent dans le domaine de surveillance médicale. Dans ce chapitre, plusieurs limitations de l'architecture WBAN traditionnelle sont élaborées. Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre les architectures et les limites existantes pour relever efficacement les défis. Cette étude est faite de telle manière à mettre en valeur les applications du WBAN que ce soit dans les domaines médicaux ou non médicaux (jeu et multimédia par exemple).

Nous avons passé en revue la recherche actuelle dans les WBANs, pour cela nous avons utilisés des travaux et publications récents sur les différents défis.

Enfin, alors que de nouvelles technologies comme SDN, EH et blockchain font leur apparition, l'intégration de ces technologies avec le WBAN apportera des changements révolutionnaires dans le secteur de la santé. On s'attend à ce que le SDN et la blockchain soient en mesure de résoudre la plupart des défis cruciaux de WBAN.

Conclusion générale

Selon le dernier rapport de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) réalisé en 2013, environ 17,5 millions de personnes sont décédées en 2012 en raison de maladies cardiovasculaires et cardiaques, première cause de mortalité dans le monde. Selon l'estimation de l'OMS, il est prévu qu'environ 25 millions de personnes mourront des suites d'une maladie cardiovasculaire d'ici 2030.

Ces statistiques constituent une base solide pour le développement de la surveillance médicale à distance en utilisant la technologie WBAN qui peut contribuer à sauver la vie des personnes de plusieurs maladies et à améliorer la qualité de leur vie.

Différents capteurs de santé du WBAN acquièrent des paramètres physiologiques spécifiques du corps humain. Ces données sont collectées, agrégées et envoyées par un coordinateur central à la destination souhaitée. Des alertes précoces ou des signes critiques peuvent être signalés en temps réel aux médecins et personnel médical pour un traitement éventuel ou une prise en charge, ou pour une analyse efficace des données afin d'obtenir des estimations physiologiques fiables et précises.

Grâce aux capteurs portables ou implantés ; légers, minuscules, ultra-faibles et intelligent ; les patients bénéficient de la liberté de mobilité et de flexibilité. Le WBAN permet la surveillance à distance des patients non seulement lorsqu'ils sont sur le lit, mais également lorsqu'ils travaillent, marchent ou jouent et cela grâce à la production en masse des capteurs qui a permis la réduction du coût du WBAN.

Dans le cadre de ce travail nous nous sommes intéressés à identifier les limites de l'architecture WBAN actuelle notamment les défis de la gestion complexe, la dépendance des fabricants, le WBAN statique, la reconfiguration du réseau, l'utilisation des ressources et la sécurité.

Nous avons par la suite établi un état de l'art des caractéristiques importantes des technologies candidates pour le WBAN et un accent particulier a été présenté sur la dernière norme, IEEE 802.15.6, pour fournir un aperçu technique des technologies de pointe dans les WBAN. De plus, une analyse approfondie a été effectuée sur les différents défis d'implémentation ainsi que les travaux qui leur sont associés, permettant de relever certains défis existants.

En dernier, de nouvelles technologies émergentes ont fait l'objet d'une présentation pour faire face aux défis du WBAN.

Nous pouvons citer :

- La technologie SDN (Software Defined Networking) avec son système de contrôle à programmation centralisée qui résout les difficultés liées à la gestion et la dépendance des fournisseurs.
- La technologie Blockchain qui fournit les enregistrements distribués/décentralisés de la chaîne de blocs qui permettent de créer une plateforme de partage de données efficace et sécurisée.
- La récolte d'énergie (EH) est une autre technologie prometteuse avec des sources d'énergie auto-durables pour WBAN.

Nous avons mis en évidence les avantages et les défis de l'intégration du SDN, de la blockchain et de l'EH dans WBAN.

Ce travail nous a permis d'accéder à un domaine de recherche très intéressant et très prometteur, dans le domaine de la surveillance médicale distante où la nécessité d'une hospitalisation a été considérablement réduite grâce aux progrès atteint.

Les perspectives sont les futures directions de recherche impliquant le WBAN basé sur SDN et blockchain combiné à la récolte d'énergie EH qui apportent des changements révolutionnaires en offrant des perspectives lucratives dans le domaine des applications IoT, en particulier dans le WBAN

Bibliographie

- [1] HADDACHE, « Réseaux Sans Fils | Radio | Gestion des ressources radio », *Scribd*, 2011 2010. <https://fr.scribd.com/document/297937377/Reseaux-Sans-Fils> (consulté le nov. 14, 2020).
- [2] A. E. Rafei, « Caractérisation à grande échelle d'un signal 60 GHz dans un environnement minier confiné », p. 97, mai 2012.
- [3] B. ALOUI r et M. N. BOULAHROUZ, « La surveillance des patients via un réseau mobile ad-hoc », Abderrahmane Mira de Bejaia Faculté des sciences exactes Département informatique, 2015.
- [4] M. A. SARI, « ETUDE DU RSSI POUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL », *Scribd*, 2017. .
- [5] A. Boudries, « Maintien de la connectivité dans les réseaux ad hoc sans fil », Thesis, 2018.
- [6] F. E. Hachemi, « Simulation de l'attaque Blackhole dans les WBANs », 2017.
- [7] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, « Wireless sensor networks: a survey », *Computer Networks*, p. 30, 2002.
- [8] « Réseaux de Capteurs Sans Fils - Anatomie d'un noeud capteur ». https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_35.html (consulté le oct. 21, 2020).
- [9] D. Ovalle, D. Patiño, et A. Montoya, « Artificial Intelligence for Wireless Sensor Networks Enhancement », 2010.
- [10] M. BENAZZOUZ, « Memoire Online - Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil - Mohamed BENAZZOUZ », *Memoire Online*, 2013. <https://www.memoireonline.com/01/14/8592/Surveillance-de-tout-point-d-une-zone-d-intert--l-aide-d-un-reseau-de-capteur-multimedia-sans.html> (consulté le nov. 14, 2020).
- [11] C.-T. Kone, « Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension », p. 187, 2011.

- [12] D. Dame, « (PDF) Optimisation distribuée de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil | Dame Diongue - Academia.edu », juin 13, 2014. .
- [13] A. Makke, « Détection d'attaques dans un système WBAN de surveillance médicale à distance », p. 164, 6Mar2015.
- [14] M. L. Messai, « Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil », Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2007.
- [15] P. K. D. Pramanik, A. Nayyar, et G. Pareek, « WBAN: Driving e-healthcare Beyond Telemedicine to Remote Health Monitoring », in *Telemedicine Technologies*, Elsevier, 2019, p. 89-119.
- [16] K. Hasan, K. Biswas, K. Ahmed, N. S. Nafi, et M. S. Islam, « A comprehensive review of wireless body area network », *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 143, p. 178-198, oct. 2019, doi: 10.1016/j.jnca.2019.06.016.
- [17] W. Badreddine, « Communication Protocols in Wireless Body Area Networks (WBAN) », p. 191, 2018.
- [18] P. Hall et Y. Hao, « Antennas and propagation for body centric communications », *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, 2006, doi: 10.1049/IC:20070537.
- [19] A. Singla et S. Malik, « Review on “A priority adaptive routing to optimize WBAN” », vol. 4, n° 6, p. 5, juin 2015.
- [20] A. Sangwan et P. Bhattacharya, « A Study on Various Issues in Different Layers of WBAN », *International Journal of Computer Applications*, vol. 129, p. 24-28, nov. 2015, doi: 10.5120/ijca2015906990.
- [21] D. Filippini, Éd., *Autonomous sensor networks: collective sensing strategies for analytical purposes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [22] H. Ben Elhadj, J. Elias, L. Chaari, et L. Kamoun, « A Priority based Cross Layer Routing Protocol for healthcare applications », *Ad Hoc Networks*, vol. 42, p. 1-18, mai 2016, doi: 10.1016/j.adhoc.2015.10.007.

- [23] L. Filipe, F. Fdez-Riverola, N. Costa, et A. Pereira, « Wireless Body Area Networks for Healthcare Applications: Protocol Stack Review », *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, p. 1-23, oct. 2015, doi: 10.1155/2015/213705.
- [24] A. J. D. Rathnayaka et V. M. Potdar, « Review: Wireless Sensor Network transport protocol: A critical review », *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 36, n° 1, p. 134–146, janv. 2013, doi: 10.1016/j.jnca.2011.10.001.
- [25] W. Su, Ö. B. Akan, et E. Cayirci, « Communication Protocols for Sensor Networks », in *Wireless Sensor Networks*, C. S. Raghavendra, K. M. Sivalingam, et T. Znati, Éd. Boston, MA: Springer US, 2004, p. 21-50.
- [26] P. Maiti, S. Addya, B. Sahoo, et A. Turuk, « Energy Efficient Wireless Body Area Network (WBAN) », 2017.
- [27] J. Y. Khan, M. R. Yuce, G. Bulger, et B. Harding, « Wireless Body Area Network (WBAN) Design Techniques and Performance Evaluation », *J Med Syst*, vol. 36, n° 3, p. 1441-1457, juin 2012, doi: 10.1007/s10916-010-9605-x.
- [28] Jamil. Y. Khan et M. R. Yuce, « Wireless body area network (WBAN) for medical applications », 2010.
- [29] A. W. Astrin, H.-B. Li, et R. Kohno, « Standardization for Body Area Networks », *IEICE Trans. Commun.*, vol. E92-B, n° 2, p. 366-372, 2009, doi: 10.1587/transcom.E92.B.366.
- [30] S. Saleem, S. Ullah, et K. S. Kwak, « A Study of IEEE 802.15.4 Security Framework for Wireless Body Area Networks », *Sensors (Basel)*, vol. 11, n° 2, p. 1383-1395, janv. 2011, doi: 10.3390/s110201383.
- [31] S. A. Salehi, M. A. Razzaque, I. Tomeo-Reyes, et N. Hussain, « IEEE 802.15.6 standard in wireless body area networks from a healthcare point of view », in *2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Yogyakarta, Indonesia, août 2016, p. 523-528, doi: 10.1109/APCC.2016.7581523.
- [32] K. S. Kwak, S. Ullah, et N. Ullah, « An overview of IEEE 802.15.6 standard », in *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, Roma, Italy, nov. 2010, p. 1-6, doi: 10.1109/ISABEL.2010.5702867.

- [33] P. Campbell, « Population Projections: States, 1995-2025 », p. 6, 1997.
- [34] D. Cypher, N. Chevrollier, N. Montavont, et N. Golmie, « Prevailing over wires in healthcare environments: benefits and challenges », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, n° 4, p. 56-63, avr. 2006, doi: 10.1109/MCOM.2006.1632650.
- [35] R. Istepanian, E. Jovanov, et Y. T. Zhang, « Introduction to the special section on M-Health: beyond seamless mobility and global wireless health-care connectivity », *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, vol. 8, n° 4, p. 405-414, déc. 2004, doi: 10.1109/titb.2004.840019.
- [36] Md. T. Arefin, M. H. Ali, et A. K. M. F. Haque, « Wireless Body Area Network: An Overview and Various Applications », *JCC*, vol. 05, n° 07, p. 53-64, 2017, doi: 10.4236/jcc.2017.57006.
- [37] J. Ooi, « Making the IoT Work in Smart Humans », *MedTech Intelligence*, oct. 21, 2019. https://www.medtechintelligence.com/feature_article/making-the-iot-work-in-smart-humans/ (consulté le nov. 08, 2020).
- [38] F. Touati et R. Tabish, « U-Healthcare System: State-of-the-Art Review and Challenges », *J Med Syst*, vol. 37, n° 3, p. 9949, juin 2013, doi: 10.1007/s10916-013-9949-0.
- [39] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao, et V. C. M. Leung, « Body Area Networks: A Survey », *Mobile Netw Appl*, vol. 16, n° 2, p. 171-193, avr. 2011, doi: 10.1007/s11036-010-0260-8.
- [40] G. Acampora, D. J. Cook, P. Rashidi, et A. V. Vasilakos, « A Survey on Ambient Intelligence in Healthcare », *Proc. IEEE*, vol. 101, n° 12, p. 2470-2494, déc. 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2262913.
- [41] M. Li et M. Zhuang, « An overview of Physical layers on wireless body area network », in *Anti-counterfeiting, Security, and Identification*, Taipei, Taiwan, août 2012, p. 1-5, doi: 10.1109/ICASID.2012.6325342.
- [42] « IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) », IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6012487.
- [43] S. Ullah, M. Mohaisen, et M. A. Alnuem, « A Review of IEEE 802.15.6 MAC, PHY, and Security Specifications », *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 9, n° 4, p. 950704, avr. 2013, doi: 10.1155/2013/950704.

- [44] K. M. S. Thotahewa, J.-M. Redouté, et M. R. Yuce, *Ultra Wideband Wireless Body Area Networks*, 1st ed. 2014. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2014.
- [45] F. Ullah, A. H. Abdullah, O. Kaiwartya, S. Kumar, et M. Md. Arshad, « Medium Access Control (MAC) for Wireless Body Area Network (WBAN): Superframe structure, multiple access technique, taxonomy, and challenges », *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 7, n° 1, p. 34, déc. 2017, doi: 10.1186/s13673-017-0115-4.
- [46] A. Boulis et Y. Tselishchev, « Contention vs. polling: a study in body area networks MAC design », in *Proceedings of the Fifth International Conference on Body Area Networks - BodyNets '10*, Corfu, Greece, 2010, p. 98, doi: 10.1145/2221924.2221944.
- [47] M. K. S. Salayma, « Reliable and Energy Efficient Scheduling Protocols for Wireless Body Area Networks (WBAN) », p. 152, 2018.
- [48] S. Ullah, B. Shen, S. M. Riazul Islam, P. Khan, S. Saleem, et K. Sup Kwak, « A Study of MAC Protocols for WBANs », *Sensors*, vol. 10, n° 1, p. 128-145, déc. 2009, doi: 10.3390/s100100128.
- [49] Cisco Networking Academy Program, Éd., *Network basics companion guide*. Indianapolis, Indiana: Cisco Press, 2014.
- [50] S. Rezvani et S. A. Ghorashi, « Context aware and channel-based resource allocation for wireless body area networks », *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 3, n° 1, p. 16-25, mars 2013, doi: 10.1049/iet-wss.2012.0100.
- [51] B. Liu, Z. Yan, et Chang Wen Chen, « CA-MAC: A Hybrid context-aware MAC protocol for wireless body area networks », in *2011 IEEE 13th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services*, Columbia, MO, USA, juin 2011, p. 213-216, doi: 10.1109/HEALTH.2011.6026748.
- [52] B. Shen, S. M. R. Islam, P. Khan, S. Saleem, et K. Kwak, « A Study of Medium Access Control Protocols for Wireless Body Area Networks », avr. 2010.
- [53] A. Rahim, N. Javaid, M. Aslam, Z. Rahman, U. Qasim, et Z. A. Khan, « A Comprehensive Survey of MAC Protocols for Wireless Body Area Networks », in *2012 Seventh International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, Victoria, BC, Canada, nov. 2012, p. 434-439, doi: 10.1109/BWCCA.2012.77.

- [54] S. Ullah, R. Islam, A. Nessa, Y. Zhong, et K. S. Kwak, « Performance Analysis of Preamble-Based TDMA Protocol for Wireless Body Area Network », *JCOMSS*, vol. 4, n° 3, p. 222, sept. 2008, doi: 10.24138/jcomss.v4i3.221.
- [55] Huaming Li et Jindong Tan, « Heartbeat-Driven Medium-Access Control for Body Sensor Networks », *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.*, vol. 14, n° 1, p. 44-51, janv. 2010, doi: 10.1109/TITB.2009.2028136.
- [56] C. Li, H.-B. Li, et R. Kohno, « Reservation-Based Dynamic TDMA Protocol for Medical Body Area Networks », *IEICE Trans. Commun.*, vol. E92-B, n° 2, p. 387-395, 2009, doi: 10.1587/transcom.E92.B.387.
- [57] B. Ota, L. Alonso, et C. Verikoukis, « Highly reliable energy-saving mac for wireless body sensor networks in healthcare systems », *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 27, n° 4, p. 553-565, mai 2009, doi: 10.1109/JSAC.2009.090516.
- [58] M. Hämäläinen et X. Li, « Recent Advances in Body Area Network Technology and Applications », *Int J Wireless Inf Networks*, vol. 24, n° 2, p. 63-64, juin 2017, doi: 10.1007/s10776-017-0348-1.
- [59] A. Rahim, N. Javaid, M. Aslam, U. Qasim, et Z. A. Khan, « Adaptive-reliable medium access control protocol for wireless body area networks », in *2012 9th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, Seoul, Korea (South), juin 2012, p. 56-58, doi: 10.1109/SECON.2012.6275829.
- [60] J. Elias et A. Mehaoua, « Energy-aware topology design for wireless body area networks », in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, Canada, juin 2012, p. 3409-3410, doi: 10.1109/ICC.2012.6363949.
- [61] S. J. Marinkovic, E. M. Popovici, C. Spagnol, S. Faul, et W. P. Marnane, « Energy-Efficient Low Duty Cycle MAC Protocol for Wireless Body Area Networks », *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.*, vol. 13, n° 6, p. 915-925, nov. 2009, doi: 10.1109/TITB.2009.2033591.
- [62] J. Bangash, A. Abdullah, M. Anisi, et A. Khan, « A Survey of Routing Protocols in Wireless Body Sensor Networks », *Sensors*, vol. 14, n° 1, p. 1322-1357, janv. 2014, doi: 10.3390/s140101322.

- [63] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, et H. Balakrishnan, « An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks », *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 1, n° 4, p. 660-670, oct. 2002, doi: 10.1109/TWC.2002.804190.
- [64] B. J. Culpepper, L. Dung, et M. Moh, « Design and analysis of Hybrid Indirect Transmissions (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks », *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 8, n° 1, p. 61-83, janv. 2004, doi: 10.1145/980159.980169.
- [65] S. Lindsey et C. S. Raghavendra, « PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems », in *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2002, vol. 3, p. 3-1125-3-1130, doi: 10.1109/AERO.2002.1035242.
- [66] L. D. P. Mendes et J. J.P.C. Rodrigues, « A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks », *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, n° 2, p. 523-534, mars 2011, doi: 10.1016/j.jnca.2010.11.009.
- [67] R. A. Uthra et S. V. K. Raja, « QoS routing in wireless sensor networks—a survey », *ACM Comput. Surv.*, vol. 45, n° 1, p. 1-12, nov. 2012, doi: 10.1145/2379776.2379785.
- [68] G. Lazzi, « Thermal effects of bioimplants », *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 24, n° 5, p. 75-81, sept. 2005, doi: 10.1109/MEMB.2005.1511503.
- [69] A. Drescher, « A Survey of Software-Defined Wireless Networks », p. 15.
- [70] L. Hu, M. Qiu, J. Song, M. S. Hossain, et A. Ghoneim, « Software defined healthcare networks », *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, n° 6, p. 67-75, déc. 2015, doi: 10.1109/MWC.2015.7368826.
- [71] G. Cova, H. Xiong, Q. Gao, E. Guerrero, R. Ricardo, et J. Estevez, « A perspective of state-of-the-art wireless technologies for e-health applications », in *2009 IEEE International Symposium on IT in Medicine & Education*, Jinan, août 2009, p. 76-81, doi: 10.1109/ITIME.2009.5236457.
- [72] T. Bhardwaj et S. C. Sharma, « Cloud-WBAN: An experimental framework for Cloud-enabled Wireless Body Area Network with efficient virtual resource utilization », *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 20, p. 14-33, déc. 2018, doi: 10.1016/j.suscom.2018.08.008.
- [73] Department of IT Convergence Engineering, School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, South Korea, G. B. Satrya, et S. Y. Shin,

« Optimizing Rule on Open Source Firewall Using Content and PCRE Combination », *JACN*, vol. 3, n° 4, p. 308-314, 2015, doi: 10.18178/JACN.2015.3.4.188.

[74] G. B. Satrya, N. D. W. Cahyani, et R. F. Andreta, « The Detection of 8 Type Malware botnet using Hybrid Malware Analysis in Executable File Windows Operating Systems », in *Proceedings of the 17th International Conference on Electronic Commerce 2015 - ICEC '15*, Seoul, Republic of Korea, 2015, p. 1-4, doi: 10.1145/2781562.2781567.

[75] M. A. Shayokh, A. Abeshu, G. B. Satrya, et M. A. Nugroho, « Efficient and secure data delivery in software defined WBAN for virtual hospital », in *2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, Bandung, Indonesia, sept. 2016, p. 12-16, doi: 10.1109/ICCEREC.2016.7814973.

[76] M. A. Hanson *et al.*, « Body Area Sensor Networks: Challenges and Opportunities », *Computer*, vol. 42, n° 1, p. 58-65, janv. 2009, doi: 10.1109/MC.2009.5.

[77] B. Johnny et A. Anpalagan, « Body Area Sensor Networks: Requirements, Operations, and Challenges », *IEEE Potentials*, vol. 33, n° 2, p. 21-25, mars 2014, doi: 10.1109/MPOT.2013.2286692.

[78] Rajandeep Kaur Virk, Shikha Tuteja, Ravinder Tonk, et Rayat and Bahra Institute of engg and Biotechnology, « Need of WBAN: A Survey », *IJERT*, vol. V4, n° 04, p. IJERTV4IS041134, avr. 2015, doi: 10.17577/IJERTV4IS041134.

[79] O. Omeni, A. C. W. Wong, A. J. Burdett, et C. Toumazou, « Energy Efficient Medium Access Protocol for Wireless Medical Body Area Sensor Networks », *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 2, n° 4, p. 251-259, déc. 2008, doi: 10.1109/TBCAS.2008.2003431.

[80] M. A. Ameen, J. Liu, S. Ullah, et K. S. Kwak, « A power efficient MAC protocol for implant device communication in Wireless Body Area Networks », in *2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, janv. 2011, p. 1155-1160, doi: 10.1109/CCNC.2011.5766358.

[81] T. O'Donovan, J. O'Donoghue, C. Sreenan, D. Sammon, P. O'Reilly, et K. A. O'Connor, « A context aware wireless body area network (BAN) », présenté à 3d International ICST Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, London, UK, 2009, doi: 10.4108/ICST.PERVASIVEHEALTH2009.5987.

- [82] G. Pradhan, R. Gupta, et S. Biswasz, « Study and simulation of WBAN MAC protocols for emergency data traffic in healthcare », in *2018 Fifth International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT)*, Kolkata, janv. 2018, p. 1-4, doi: 10.1109/EAIT.2018.8470432.
- [83] R. Saha, S. Biswas, et G. Pradhan, « A priority based routing protocol with extensive survey and comparison of related works for healthcare applications using WBAN », in *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, mars 2017, p. 1424-1430, doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8299998.
- [84] S. Marinkovic, C. Spagnol, et E. Popovici, « Energy-Efficient TDMA-Based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks », in *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Athens, Greece, juin 2009, p. 604-609, doi: 10.1109/SENSORCOMM.2009.99.
- [85] B. Braem *et al.*, « The Need for Cooperation and Relaying in Short-Range High Path Loss Sensor Networks », in *2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007)*, Valencia, oct. 2007, p. 566-571, doi: 10.1109/SENSORCOMM.2007.4394980.
- [86] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, et A. Jamalipour, « Wireless Body Area Networks: A Survey », *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, n° 3, p. 1658-1686, 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.121313.00064.
- [87] S. Ullah *et al.*, « A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks: On PHY, MAC, and Network Layers Solutions », *J Med Syst*, vol. 36, n° 3, p. 1065-1094, juin 2012, doi: 10.1007/s10916-010-9571-3.
- [88] G. Selimis *et al.*, « A Lightweight Security Scheme for Wireless Body Area Networks: Design, Energy Evaluation and Proposed Microprocessor Design », *J Med Syst*, vol. 35, n° 5, p. 1289-1298, oct. 2011, doi: 10.1007/s10916-011-9669-2.
- [89] C. C. Y. Poon, Yuan-Ting Zhang, et Shu-Di Bao, « A novel biometrics method to secure wireless body area sensor networks for telemedicine and m-health », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, n° 4, p. 73-81, avr. 2006, doi: 10.1109/MCOM.2006.1632652.
- [90] D. He, C. Chen, S. Chan, J. Bu, et A. V. Vasilakos, « A Distributed Trust Evaluation Model and Its Application Scenarios for Medical Sensor Networks », *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.*, vol. 16, n° 6, p. 1164-1175, nov. 2012, doi: 10.1109/TITB.2012.2199996.

- [91] D. He, C. Chen, S. Chan, J. Bu, et A. V. Vasilakos, « ReTrust: Attack-Resistant and Lightweight Trust Management for Medical Sensor Networks », *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.*, vol. 16, n° 4, p. 623-632, juill. 2012, doi: 10.1109/TITB.2012.2194788.
- [92] C. A. Chin, G. V. Crosby, T. Ghosh, et R. Murimi, « Advances and challenges of wireless body area networks for healthcare applications », in *2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Maui, HI, USA, janv. 2012, p. 99-103, doi: 10.1109/ICCNC.2012.6167576.
- [93] N. Wisniewski et M. Reichert, « Methods for reducing biosensor membrane biofouling », *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 18, n° 3-4, p. 197-219, oct. 2000, doi: 10.1016/S0927-7765(99)00148-4.
- [94] G.-Z. Yang, Éd., *Body Sensor Networks*. London: Springer London, 2014.
- [95] S. Ullah et K. S. Kwak, « Throughput and delay limits of IEEE 802.15.6 », in *2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Cancun, Mexico, mars 2011, p. 174-178, doi: 10.1109/WCNC.2011.5779126.
- [96] N. Xiong *et al.*, « Comparative analysis of quality of service and memory usage for adaptive failure detectors in healthcare systems », *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 27, n° 4, p. 495-509, mai 2009, doi: 10.1109/JSAC.2009.090512.
- [97] G. Zhou, J. Lu, C.-Y. Wan, M. D. Yarvis, et J. A. Stankovic, « BodyQoS: Adaptive and Radio-Agnostic QoS for Body Sensor Networks », in *IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications*, Phoenix, AZ, USA, avr. 2008, p. 565-573, doi: 10.1109/INFOCOM.2008.105.
- [98] S. Warren et E. Jovanov, « The need for rules of engagement applied to wireless body area networks », in *CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006.*, Las Vegas, NV, USA, 2006, vol. 2, p. 979-983, doi: 10.1109/CCNC.2006.1593184.
- [99] D. Takahashi, Y. Xiao, et F. Hu, « LTRT: Least Total-Route Temperature Routing for Embedded Biomedical Sensor Networks », in *IEEE GLOBECOM 2007-2007 IEEE Global Telecommunications Conference*, Washington, DC, USA, nov. 2007, p. 641-645, doi: 10.1109/GLOCOM.2007.125.

- [100] A. Bag et M. A. Bassiouni, « Hotspot Preventing Routing Algorithm for Delay-Sensitive Biomedical Sensor Networks », in *2007 IEEE International Conference on Portable Information Devices*, Orlando, FL, USA, mai 2007, p. 1-5, doi: 10.1109/PORTABLE.2007.30.
- [101] F. T. Zuhra, K. A. Bakar, A. Ahmed, et M. A. Tunio, « Routing protocols in wireless body sensor networks: A comprehensive survey », *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 99, p. 73-97, déc. 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2017.10.002.
- [102] K. Awan, K. N. Qureshi, et M. Mehwish, « Wireless Body Area Networks Routing Protocols: A Review », *IJECS*, vol. 4, n° 3, p. 594, déc. 2016, doi: 10.11591/ijeecs.v4.i3.pp594-604.
- [103] J. H. Cox *et al.*, « Advancing Software-Defined Networks: A Survey », *IEEE Access*, vol. 5, p. 25487-25526, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2762291.
- [104] V. Varadharajan, U. Tupakula, et K. Karmakar, « Secure Monitoring of Patients With Wandering Behavior in Hospital Environments », *IEEE Access*, vol. 6, p. 11523-11533, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773647.
- [105] B. Trevizan de Oliveira, L. Batista Gabriel, et C. Borges Margi, « TinySDN: Enabling Multiple Controllers for Software-Defined Wireless Sensor Networks », *IEEE Latin Am. Trans.*, vol. 13, n° 11, p. 3690-3696, nov. 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7387950.
- [106] Younghwan Choi, Yunchul Choi, et Yong-Geun Hong, « Study on coupling of software-defined networking and wireless sensor networks », in *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Vienna, Austria, juill. 2016, p. 900-902, doi: 10.1109/ICUFN.2016.7536926.
- [107] K. Hasan, X.-W. Wu, K. Biswas, et K. Ahmed, « A Novel Framework for Software Defined Wireless Body Area Network », in *2018 8th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, mai 2018, p. 114-119, doi: 10.1109/ISMS.2018.00031.
- [108] M. Mettler, « Blockchain technology in healthcare: The revolution starts here », in *2016 IEEE 18th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*, Munich, Germany, sept. 2016, p. 1-3, doi: 10.1109/HealthCom.2016.7749510.

- [109] P. B. Nichol, « Blockchain applications for healthcare », *CIO*, mars 17, 2016. <https://www.cio.com/article/3042603/blockchain-applications-for-healthcare.html> (consulté le nov. 22, 2020).
- [110] S. Jiang, J. Cao, H. Wu, Y. Yang, M. Ma, et J. He, « BloCHIE: A BLOCkchain-Based Platform for Healthcare Information Exchange », in *2018 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, Taormina, juin 2018, p. 49-56, doi: 10.1109/SMARTCOMP.2018.00073.
- [111] K. Hasan, K. Biswas, K. Ahmed, et S. Islam, « Challenges of Integrating Blockchain in Wireless Body Area Network », p. 4.
- [112] F. Akhtar et M. H. Rehmani, « Energy Harvesting for Self-Sustainable Wireless Body Area Networks », *IT Prof.*, vol. 19, n° 2, p. 32-40, mars 2017, doi: 10.1109/MITP.2017.34.
- [113] C. Gould et R. Edwards, « Review on micro-energy harvesting technologies », in *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Coimbra, sept. 2016, p. 1-5, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114023.
- [114] M. Saida, G. Zaibi, M. Samet, et A. Kachouri, « Improvement of energy harvested from the heat of the human body », in *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia, déc. 2016, p. 132-137, doi: 10.1109/STA.2016.7952072.
- [115] S. Akbari, « Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Review », sept. 2014, p. 987-992, doi: 10.15439/2014F85.

