

# UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de  
L'Information et de la Communication

Département d'Informatique et des Technologies de l'Information



## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine :** Informatique

**Filière :** Informatique

**Spécialité :** Réseaux Convergence et Sécurité

**Présenté par :** RAACHE Badreddine

BERRAH Belkhir

**Thème**

**ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE ROUTAGE  
CLUSTERING ET QoS DANS LES WBANS POUR  
M-HEALTH**

**Soutenu publiquement le : 26/06/2017**

Devant le jury composé de :

M. ....

M. *Djediai Ahmida*

M. ....

M. ....

Président

Encadreur/rapporteur

Examineur

Examineur

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

**Année Universitaire : 2016 /2017**

## Remerciements

*En tout premier lieu, Nous remercier le bon dieu tout puissant de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur **Djediai Ahmida**; maitre-assistant A à Université Kasdi Merbah Ouargla, qui, en tant qu'encadreur de ce mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de notre travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.*

**BERRAH & RAACHE**

## Dédicace

*A nos Grands Famille,*

*A nos Petites Familles,*

*A tous nos amis,*

*A tous ceux qui nous aiment,*

*A tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin,*

***On dédie ce Travail***

***BERRAH & RAACHE***

## Résumer

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

Les WBAN sont Faces à de nombreuses exigences en termes de délai, consommation d'énergie, de température et de durée de vie du réseau, qui doivent être prises en considération dans la conception de différents protocoles. Étant donné que les protocoles de routage jouent un rôle important dans la performance générale du système en termes de retard, de consommation d'énergie, de température, etc., une étude est nécessaire et approfondie sur les protocoles de routage existants dans les WBAN. En outre, les défis spécifiques des WBAN nécessitent la conception de nouveaux protocoles de routage spécialement conçus pour les WBAN. Ce rapport de mémoire fournit un aperçu sur les protocoles de routage existants destinés principalement pour les WBAN. Ces protocoles sont également classés en cinq classes principales, à savoir, la température, cross layer, clustering, probabiliste et routage basé sur le QoS, où chaque protocole est décrit dans sa classe spécifiée.

L'objectif de notre travail est d'effectuer une étude comparative entre deux protocoles de routage dédiés aux réseaux WBAN dans l'environnement de simulation « OMNET++ » et en exploitant la plateforme de simulation des WBAN "CASTALIA".

**Les mots clés :** WBANs, WSNs, m-health, routage, QoS, Clustering, OMNet++ et Castalia.

## Abstract

Recent technological advancements in wireless communication, integrated circuits and Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMs) has enabled miniaturized, lowpower, intelligent, and nanotechnology sensor nodes placed in or on the human body for use in monitoring body function and its immediate environment referred to as Body Area Networks (BANs).

The BANs face many stringent requirements in terms of delay, power, temperature and network lifetime which need to be taken into serious consideration in the design of different protocols. Since routing protocols play an important role in the overall system performance in terms of delay, power consumption, temperature and so on, a thorough study on existing routing protocols in WBANs is necessary. Also, the specific challenge of WBANs necessitates the design of new routing protocols specifically designed for WBANs. In This thesis provides a survey of existing routing protocols mainly proposed for WBANs. These protocols are further classified into five main categories namely, temperature based, cross layer, cluster based, Probabilistic based and QoS-based routing, where each protocol is described under its specified category.

The objective of this Works is to make a comparison between two routing protocols dedicated to WBAN networks in the simulation environment "OMNET ++" and the platform of simulations of wireless sensor networks "CASTALIA".

**Keywords:** WBANs, WSNs, m-health, routage, QoS, Clustering, OMNet++ et Castalia .

## ملخص

لقد مكنت التطورات التكنولوجية الحديثة في مجال الاتصالات اللاسلكية والدوائر المتكاملة والأنظمة الدقيقة الكهروميكانيكية (MEMS) من استخدام أجهزة الاستشعار المصغرة والمتناهية الصغر والذكية التي توضع في أو على جسم الإنسان لتستخدم في مراقبة وظيفة الجسم والبيئة المحاطة به المسماة شبكات المستشعرات اللاسلكية لنطاق الجسم (BANs). وتواجه هذه الشبكات العديد من التحديات المهمة من حيث السرعة في رصد وتوصيل المعطيات، استهلاك الطاقة، ودرجة الحرارة المنبعثة، و مدة الحياة الشبكة التي تحتاج إلى النظر فيها بجدية في تصميم بروتوكولات شبكات المعلوماتية المختلفة. و بما أن بروتوكولات التوجيه تلعب دورا هاما في أداء النظام بشكل عام من حيث العناصر المذكورة أعلاه وما شابهها، فإن من الضروري إجراء دراسة شاملة لبروتوكولات التوجيه الموجودة في شبكات (BANs). كما أن التحديات المحددة التي تفرضها شبكات المستشعرات اللاسلكية لنطاق الجسم (BANs) تتطلب تصميم بروتوكولات توجيه جديدة مصممة خصيصا لأنظمة الاستشعار . والهدف من هذه العمل هو القيام بمقارنة بين بروتوكولين من بروتوكولات التوجيه المخصصة لشبكات WBAN في بيئة محاكاة "OMNET++" ومنصة محاكاة شبكات المستشعرات اللاسلكية لنطاق الجسم "CASTALIA".

### كلمات البحث :

WBANs, WSNs, m-health, routage, QoS, Clustering, OMNet++ et Castalia

# Sommaire

---

<b>REMERCIEMENTS</b>	II
<b>SOMMAIRE</b>	IV
<b>LISTE DES FIGURES</b>	VIII
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	X
<b>RESUME</b>	XI
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	XIII
<b>CHAPITRE 1 : Etat d'art des RCSFs et des WBANs</b>	
<b>I Introduction</b>	02
<b>II Les Réseaux sans fil</b>	02
II.1 Définition et avantages d'un réseau sans fil	02
II.2 Classification des réseaux sans fil	03
II.2.1 Classification en fonction de la taille du réseau	03
II.2.1.1 Les WPAN (Wireless Personal Area Networks)	03
II.2.1.2 Les WLAN (Wireless Local Area Networks)	03
II.2.1.3 Les WMAN (Wireless Métropolitain Area Networks)	03
II.2.1.4 Les WWAN (Wireless Wide Area Networks)	03
II.2.2 Classification des réseaux suivant le mode opératoire	04
II.2.2.1 Le mode avec infrastructure	04
II.2.2.2 Le mode sans infrastructure (Ad hoc)	04
<b>III Réseaux de capteurs sans fil (WSN)</b>	05
<b>IV Les capteurs sans fil</b>	06
IV.1 Architecture d'un micro capteur	06
IV.1.1 L'unité de captage	07
IV.1.2 L'unité de traitement	07
IV.1.3 L'unité de transmission	07
IV.1.4 L'unité de contrôle d'énergie	07
<b>V Applications des réseaux de capteurs sans fil</b>	08
V.1 Applications militaires	09
V.2 Applications à la sécurité	09
V.3 Applications environnementales	09
V.4 Applications commerciales	09
V.5 Applications médicales	10
<b>VI La pile protocolaire adoptée par les RCSFs</b>	10
<b>VII Technologies de communications sans fil</b>	11
VII.1 La norme IEEE 802.15.1 / Bluetooth	11
VII.2 La norme Wibree (Ultra Low Power Bluetooth)	12
VII.3 La norme IEEE 802.15.3 / UWB (Ultra Wide Band)	12
VII.4 La norme IEEE 802.15.4 / Zigbee	12
VII.5 La norme IEEE 802.15.6	13
VII.6 La norme IEEE 802.11x/WiFi	13
<b>VIII Les réseaux WBAN (Wireless Body Area Network)</b>	14
VIII.1 Définition	14

VIII.2	Classification des WBAN	14
VIII.2.1	Classification de IEEE 802.15.6	14
VIII.2.2	Classification par position de capteur	17
VIII.3	Architecture d'un WBAN	17
VIII.4	Comparaison entre les réseaux WBAN et les réseaux de capteurs sans fil (WSN)	18
VIII.5	Topologies des réseaux WBAN	19
VIII.5.1	Topologie point à point	19
VIII.5.2	Topologie en étoile	19
VIII.5.3	Topologie en maille	20
VIII.5.4	Topologie Hybrid	20
VIII.6	Caractéristiques et exigences des WBANs	21
VIII.7	Les communications dans les réseaux WBAN	23
VIII.7.1	Communications « Intra-BAN »	23
VIII.7.2	Communications « Inter-BAN »	24
VIII.7.3	Communications « Au-delà de BAN »	24
VIII.8	Contraintes des réseaux WBAN	24
VIII.8.1	Contraintes matérielles	24
VIII.8.2	Contraintes réseaux	24
IX	<b>Conclusion</b>	25

## **CHAPITRE 2 : Les protocoles de routage dans les réseaux WBANs**

I	<b>Introduction</b>	27
II	<b>Les défis des réseaux WBAN</b>	27
II.1	Mouvements du posturaux de corps	27
II.2	La consommation d'énergie	27
II.3	Température et interférence	28
II.4	La durée de vie de réseau	28
II.5	Tolérance aux pannes	28
II.6	Fiabilité et sécurité	28
II.7	Le porté de transmission	29
II.8	Limitation du nombre de sauts	29
II.9	la diversité de l'environnement	29
II.10	Limitation des ressources	30
III	<b>Classification des protocoles de routage dans les WBANs</b>	30
III.1	Protocoles basés sur le clustering	30
III.1.1	LEACH	
III.1.2	Any Body	30
III.1.3	Hybrid Indirect Transmission (HIT)	31
III.2	Protocoles probabilistes	31
III.2.1	Prediction-based Secure and Reliable routing (PSR)	31
III.2.2	Probabilistic Routing with postural link costs (PRPLC)	31
III.2.3	Distance Victor routing with postural link costs (DVR- PLC)	32
III.2.4	On-Body Store and Forward Routing (OBSFR)	32
III.2.5	Energy Efficient Thermal and Power Aware Routing protocol (ETPA)	32
III.3	Protocoles inter-couche (cross-layer)	33
III.3.1	Wireless Autonomous Spanning Tree Protocol (WASP)	33

III.3.2	Controlling Access with Distributed slot Assianment (CICADA)	33
III.3.3	BIOCOMM	34
III.4	Protocoles basés sur la QoS	34
III.4.1	LOCALMOR	34
III.4.2	Data-centric Multi-objiectiveQoS-awarerouting (DMQoS)	34
III.4.3	Framework de QoS	.35
III.5	Protocoles basés sur la température	35
III.5.1	Thermal-aware Routing algorithme (TARA)	36
III.5.2	Least Température Routing (LTR)	36
III.5.3	Hotspot Preventing Routing (HPR)	36
III.5.4	Routing algorithm for networks of homogenous and Id-less biomedical sensor nodes (RAIN)	37
III.5.5	Thermal-Aware Shortest Hop Routing (TSHR)	37
IV	<b>Conclusion</b>	37

### **CHAPITRE 3 : Simulation des protocoles de routage adoptés**

I	<b>Introduction</b>	39
II	<b>Les protocoles de routage choisi pour l'étude</b>	40
II.1	Le protocole de routage hiérarchique LEACH	40
II.1.1	Architecture du LEACH	40
II.1.2	Algorithme détaillé de LEACH	41
II.1.3	Interférences entre groupes	43
II.2	A Routing Protocol Based On Energy And Link Quality (REL)	43
II.2.1	Estimation de la qualité du lien	43
II.2.2	Sélection de chemin et équilibrage de charge	45
III	<b>Les simulateurs de réseau sans fil</b>	48
III.1	NS2	48
III.2	GloMoSim	49
III.3	OMNET++	50
IV	<b>Comparaison entre les simulateurs</b>	50
V	<b>Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++)</b>	52
V.1	Choix du simulateur OMNET++	52
V.1.1	Présentation d'OMNET++	52
V.1.2	Description architecturale d'OMNET++	53
V.1.3	Installation du simulateur OMNeT++	54
V.1.4	Les principaux fichiers d'OMNET++	54
V.2	Les plates-formes d'OMNET++	57
V.2.1	Mixim	57
V.2.2	Castalia	57
V.3	Détails sur Castalia	58
V.3.1	Le module MAC	59
V.3.2	Le module Radio	59
V.3.3	Canal sans fil	59
V.3.4	Le module Routage	59
V.3.5	Le module Application	60
VI	<b>Outils de Simulation</b>	60
VI.1	Installation d'OMNET++ Version 4.6	60

VI.2	Installation de Castalia3.2	61
VII	<b>Conclusion</b>	62
<b>CHAPITRE 4 : Implémentation et Simulation</b>		
I	<b>Introduction</b>	64
II	<b>Environnement de Simulation</b>	64
II.1	Environnement matériel	64
II.2	Environnement logiciel	65
III	<b>Réalisation de la simulation</b>	65
III.1	Objectif	65
III.2	Description du réseau des capteurs	65
III.3	Implémentation des protocoles de routages	66
IV	<b>Exécution de la simulation est présentation des résultats Obtenus</b>	68
IV.1	Paramètres de simulation	68
IV.2	Déploiement des capteurs sans fil	68
IV.3	Fichiers résultats	69
IV.3.1	Fichier Trace	69
IV.3.2	Fichier Résumé	69
IV.4	Présentation et discussions des résultats obtenus	70
IV.4.1	La Consommation d'énergie	70
IV.4.2	Nombre de paquet transmet	71
IV.4.3	Durée de vie du réseau	72
V	<b>Conclusion</b>	73
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		75
<b>LISTE DES ACRONYMES</b>		76
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		78

# Liste des figures

---

Figure 01 :	Exemple d'un WBANs	01
Figure 02 :	Classification des réseaux sans fil suivant leur taille	03
Figure 03 :	Réseau de capteur sans fil (WSN)	05
Figure 04 :	Exemple Les composants d'un nœud capteur sans fil	06
Figure 05 :	Architecture d'un micro capture	06
Figure 06:	Les différentes applications RCSF	08
Figure 07:	La Pile protocolaire dans RCSFs	10
Figure 08:	Les Technologies de communications sans fil	13
Figure 09:	Wireless Body Area Networks.	14
Figure 10:	infrastructure de m-health en temps réel pour la réhabilitation des patients	17
Figure 11:	Topologie point à point	19
Figure 12:	Topologie en étoile	19
Figure 13:	Topologie en maille	20
Figure 14:	Topologie Hybrid	20
Figure 15:	Architecture générale des communications dans un système BAN	23
Figure 16:	Les Protocole de routage dans WBANs	37
Figure 17:	Architecture du routage hiérarchique LEACH	41
Figure 18:	Estimation de la qualité des liens (bout en bout)	45
Figure 19:	Description architecturale du simulateur NS2	49
Figure 20:	Transfert des paquets dans GloMoSim	50
Figure 21:	Le lancement du simulateur Omnet++	54
Figure 22:	Architecture Modulaire du simulateur Omnet++	54
Figure 23:	Fichier NED en mode graphique	56
Figure 24:	Fichier NED en mode texte	56
Figure 25:	Exemple d'un Fichier *.Ini	57
Figure 26:	Les connections des modules sous Castalia	58
Figure 27:	Les principaux composants d'un nœud	59
Figure 28:	Les étapes d'installation d'OMNeT en mode CMD	61
Figure 29:	Présentation graphique du fichier SensorNetwork.ned	66
Figure 30:	Code source du fichier d'initialisation omnet.ini	67
Figure 31:	Exemple d'exécution de la simulation du protocole LEACH	68
Figure 32:	Exemple de contenu du fichier trace	69
Figure 33:	Exemple de contenu du fichier résumé	69
Figure 34:	Exemple d'un graph représentant l'énergie consommée obtenu par ligne de commande	70
Figure 35:	L'énergie moyenne consommée par chaque nœud	71
Figure 36:	L'énergie totale consommée dans le réseau	71
Figure 37:	Le nombre moyen de paquets transmits par chaque nœud	72
Figure 38:	Le nombre Total des paquets transmits à travers le réseau	72
Figure 39:	Durée de vie d'un réseau de 16 nœuds	73
Figure 40:	Durée de vie d'un réseau de 32 nœuds	73

# Liste des Tableaux

---

Tableau 01 :	Classification des applications WBAN selon IEEE 802.15.6	16
Tableau 02 :	IN /ON-Body application de WBAN	17
Tableau 03 :	WBANs vs WSNs	18
Tableau 04 :	Caractéristiques et exigences de WBAN	22
Tableau 05 :	Comparaison des Protocoles de routage probabiliste dans WBAN	32
Tableau 06:	Les avantages et les inconvénients des simulateurs	52
Tableau 07:	caractéristiques générales du PC utilisé pour la simulation	65
Tableau 08:	Paramètres généraux de la simulation	68

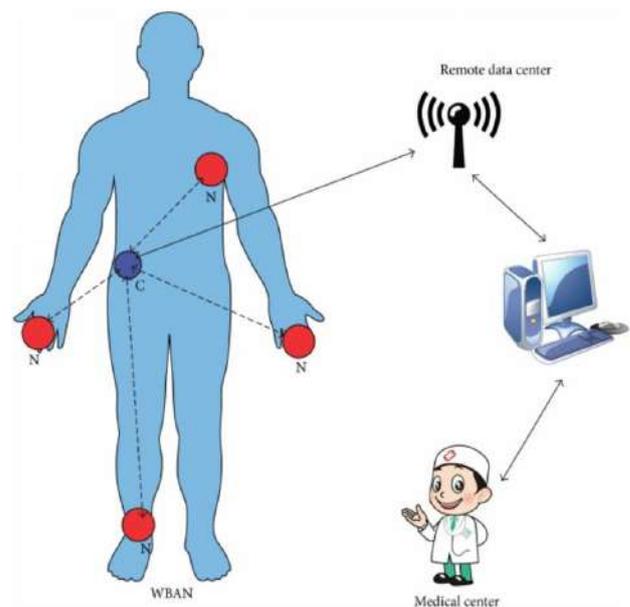
# **INTRODUCTION GENERALE**

## *Introduction Générale*

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) connaissent, depuis plusieurs décennies, un développement rapide. Le secteur de la santé, en particulier, a vu se multiplier de très nombreuses applications.

La télémédecine (télédiagnostic, télésurveillance, télé-encadrement, télé-chirurgie...), le M-Health (informations et prestations sur le net, gestion en ligne des dossiers médicaux...) offrent aux praticiens et aux patients, des sources d'information et des services nouveaux.

L'essor des nouvelles technologies ainsi que les progrès effectués dans les domaines des micro-électroniques, des télécommunications, des réseaux et du traitement de l'information ont permis de produire à coût raisonnable des capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseau appelé communément réseau de capteur sans fil. Dans un scénario d'application classique, les capteurs sont déployés dans un champ d'intérêt afin de mesurer certains phénomènes physiques et de faire remonter les informations collectées à une station de base, nommée le nœud puits (Sink). Ce dernier a plus de ressources que les autres nœuds et peut traiter les informations reçues localement. Le nœud Sink est administré par un utilisateur via un réseau externe (internet, satellite, etc.). Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil sont nombreux et variés du fait notamment de la variété des capteurs. Parmi les domaines qui ont été révolutionnés par les réseaux de capteurs sans fil, on trouve le domaine médical. Les réseaux de capteurs sans fil utilisés dans le domaine médical sont appelés réseaux de capteurs corporels ou simplement WBANs (Wireless Body Area Networks). Ces dispositifs ont révolutionné les systèmes de télémédecine en améliorant la qualité du soin et en réduisant les coûts énormes associés à des patients ambulants dans les hôpitaux. Grâce aux réseaux de capteurs corporels, la surveillance des patients peut avoir lieu en temps réel même en dehors de l'hôpital (dans l'environnement familial, voire professionnel, ce qui est devenu le souhait de tout patient) et sur une plus longue période.



**Figure 1 : Exemple d'un WBANs.**

## *Introduction Générale*

---

---

Les réseaux de capteurs corporels sans fil (WBAN) sont constitués généralement de très petits dispositifs électroniques (micro-capteurs), capables de détecter, de calculer, de stocker et communiquer des grandeurs physiques entre eux sans fil. Ces petits dispositifs sont appelés des nœuds capteurs, ils forment ensemble un réseau appelé réseau de capteurs corporel sans fil (WBAN) qui fournit des informations utiles prises par les différents capteurs et les communique ensuite via un support sans fil à un point de collecte principale appelé "Sink" qui les communique lui aussi à son tour à un poste de contrôle distant.

Les micro-capteurs se sont des composants électroniques de quelques millimètres cubes de volume, qui intègrent :

- Une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques (température du corps, tension artérielle, battement du cœur ...etc.) et de les transformer en grandeurs numériques.
- Une unité de traitement informatique et de stockage de données.
- Un module de transmission sans fil.

Ces micro-capteurs fonctionnent de façon autonome nécessitent forcément l'utilisation d'une batterie comme source d'énergie ce qui implique une durée de vie limité du capteur voir du WBAN même.

D'un autre coté les opérations de captage, traitement et communication des donnés par les micro-capteurs implique une consommation d'énergie plus au moins importante c'est ainsi que plusieurs recherches sont consacrées dans le but d'optimiser la consommation d'énergie, la durée de vie du réseau, la température et l'interférence, ...etc.

Dans ce sens plusieurs protocoles de routage ont été proposés afin d'optimiser la consommation d'énergie et de prolonger par conséquence la durée de vie du réseau.

Un protocole de routage qui permet l'acheminement des informations au sein du réseau avec l'envoi des messages entre nœuds capteurs pour la collecte et le transfert d'information. Ce qui s'avère coûteux en matière d'énergie et qui cause l'épuisement des batteries, la perte des données et la diminution de la durée de vie du WBAN.

L'objectif de notre travail est d'effectuer une étude comparative entre deux protocoles de routage dédiés aux réseaux WBAN dans l'environnement de simulation "OMNET++" et en exploitant les fonctionnalités de la plateforme de simulation de réseaux de capteur sans fil "CASTALIA".

Ce rapport est organisé en 4 Chapitres :

- **Chapitre 1** : Représente un état de l'art dans lequel un aperçu sur les réseaux RCSFs en générale et les WBANs en particulier sera présenté.
- **Chapitre 2** : Les protocoles de routage utilisé dans les réseaux WBAN.

- **Chapitre 3** : Constitue le cœur de cette contribution, une étude comparative entre deux protocoles (LEACH de la classe clustering et le protocole REL de la classe QoS), nous expliquerons l'architecture et l'algorithme détaillé de chacun des deux protocoles. Ensuite un comparatif entre les différents simulateurs enrichira le contenu du chapitre, et on détaillera un peu les outils de simulation que nous avons choisi à savoir OMNet++ et Castalia.
- **Chapitre 4** : nous allons détailler le code d'implémentation des deux protocoles, rapporter les résultats de la simulation, et commenter par la suite chacun des résultats obtenus.
- **Enfin**, une conclusion générale sur notre travail sera présentée ainsi que les perspectives à suggérées.

# **CHAPITRE I**

## **Etat d'art des RCSFs et des WBANs**

## **I. Introduction :**

L'évolution dans le domaine des communications sans fil et l'informatique mobile gagne de plus en plus de popularité et les composants mobiles deviennent de plus en plus fréquents (PDA, LAPTOPS, HANDSETS...). Ceci a permis l'apparition d'un nouveau type de réseaux sans fils appelé réseaux de capteur sans fils (RCSF en Français ou WSN en anglais) qui sont devenu de plus en plus populaires du fait de leur facilité de déploiement. Les WSN ont révolutionné de nombreux secteurs et notamment le secteur médical. En effet, ils permettent de contrôler les patients à distance. Les WSN appliqués au domaine médical sont appelés réseaux de capteurs corporels sans fil ou WBAN (Wireless Body Area Network).

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement les réseaux de capteurs sans fil WSN et notamment les réseaux de capteurs corporels sans fil WBANs.

## **II. Les réseaux sans fil :**

### **II.1. Définition et avantages d'un réseau sans fil :**

En général on appelle réseau est un ensemble des nœuds reliés entre eux par des liens ou canaux de communication dans le but d'échanger des informations.

Selon le type des nœuds, on distingue : les réseaux de télécommunication dans lesquels les nœuds sont les stations mobiles, les stations de base (BTS), les contrôleurs des stations de base (BSC), les commutateurs (MSC) ; et les réseaux informatiques dans lesquels les nœuds sont les ordinateurs, les imprimantes, les routeurs, les switches ou tout autre équipement informatique. [01]

Selon le type de canaux de communication, on distingue : les réseaux filaires qui utilisent un canal de transmission matériel (le câble coaxial, les paires torsadées, la fibre optique) et les réseaux sans fils.

Les réseaux sans fil sont ceux qui utilisent le canal air pour communiquer en utilisant les ondes hertziennes, les infrarouges, Bluetooth...etc. L'utilisation des réseaux sans fil procure plusieurs avantages, notamment :

- L'usage facile dans les endroits à câblage difficile.
- La réduction du temps de déploiement et d'installation.
- La réduction des coûts d'entretien.
- L'augmentation de la connectivité.
- La portabilité, le nomadisme et même la mobilité.

## II.2. Classification des réseaux sans fil

### II.2.1. Classification en fonction de la taille du réseau

#### II.2.1.1. Les WPAN (Wireless Personal Area Networks) :

Leur portée maximale est limitée à quelques dizaines de mètres autour de l'utilisateur. (Ex : Bluetooth, l'Ultra Wide Band (UWB), ZIGBEE...etc.).

#### II.2.1.2. Les WLAN (Wireless Local Area Networks) :

C'est la catégorie des réseaux locaux sans fil dont la portée va jusqu'à 500 m, pour les applications couvrant un campus, un bâtiment, un aéroport, un hôpital, etc. (Ex : Wi-Fi).

#### II.2.1.3. Les WMAN (Wireless Métropolitain Area Networks) :

Plus connus sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR), ce type de réseau utilise le même matériel que celui qui est nécessaire pour constituer un WLAN mais peut couvrir une plus grande zone de la taille d'une ville avec une portée pouvant aller jusqu'à 50 Km. C'est dans cette catégorie que l'on classe le WiMax.

#### II.2.1.4. Les WWAN (Wireless Wide Area Networks) :

C'est la catégorie de réseaux cellulaires mobiles dont la zone de couverture est très large, à l'échelle mondiale. Dans cette catégorie, on peut citer le GSM et ses évolutions (GPRS, EDGE), le CDMA et l'UMTS.

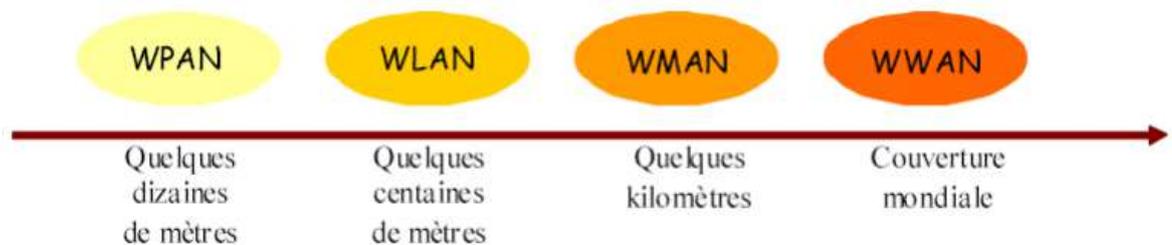


Figure 2 : Classification des réseaux sans fil suivant leur taille.

## **II.2.2. Classification des réseaux suivant le mode opératoire**

Dans les réseaux sans fil, on distingue deux modes opératoires :

### **II.2.2.1. Le mode avec infrastructure :**

En mode infrastructure, le réseau est composé de plusieurs cellules et chacune d'elles comprend une station de base (ou un point d'accès) par laquelle toutes les autres stations de la cellule accèdent au réseau intra et intercellulaire. Les différents points d'accès sont reliés entre eux et/ou au réseau Internet à l'aide d'une technologie supplémentaire qui peut être filaire ou hertzienne. Dans cette catégorie, on trouve les réseaux WLAN (Wi-Fi), WMAN (WiMAX) et WWAN (GSM).

### **II.2.2.2. Le mode sans infrastructure (Ad hoc).**

En mode ad hoc, il n'y a pas de point d'accès fixe, l'infrastructure n'est composée que des stations elles-mêmes, ces dernières jouant à la fois le rôle de terminaux et de routeurs pour permettre le passage de l'information d'un terminal vers un autre sans que ces terminaux soient reliés directement. La caractéristique essentielle d'un réseau ad-hoc est l'existence de tables de routage dynamiques dans chaque nœud. C'est la catégorie des réseaux WPAN tels que le Bluetooth.

## **III. Réseaux de capteurs sans fil (WSN):**

Les réseaux de capteurs sans fil [1] (RCSFs ou WSNs : Wireless sensor networks en anglais) sont devenus de plus en plus omniprésents. Les milieux scientifiques et industriels leur prêtent de plus en plus d'attention du fait de leurs riches applications dans les domaines: médical, commercial et militaire. Selon MIT's Technology Review, il s'agit de l'une des dix nouvelles technologies qui vont influencer sur notre manière de vivre et de travailler. Les RCSFs sont des réseaux de nœuds sans fil dédiés à des applications spécifiques. Ils sont considérés comme un type particulier des réseaux Ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des capteurs intelligents (smart sensors). Les RCSFs sont composés d'un nombre potentiellement très grand (plusieurs milliers) de capteurs qui se communiquent selon un modèle de communication « sources multiples - destination unique », déployés dans la zone à couvrir. Chaque capteur est capable d'effectuer d'une manière autonome trois tâches complémentaires : mesure d'une valeur physique, traitement de ses mesures, et communication par voie hertzienne.

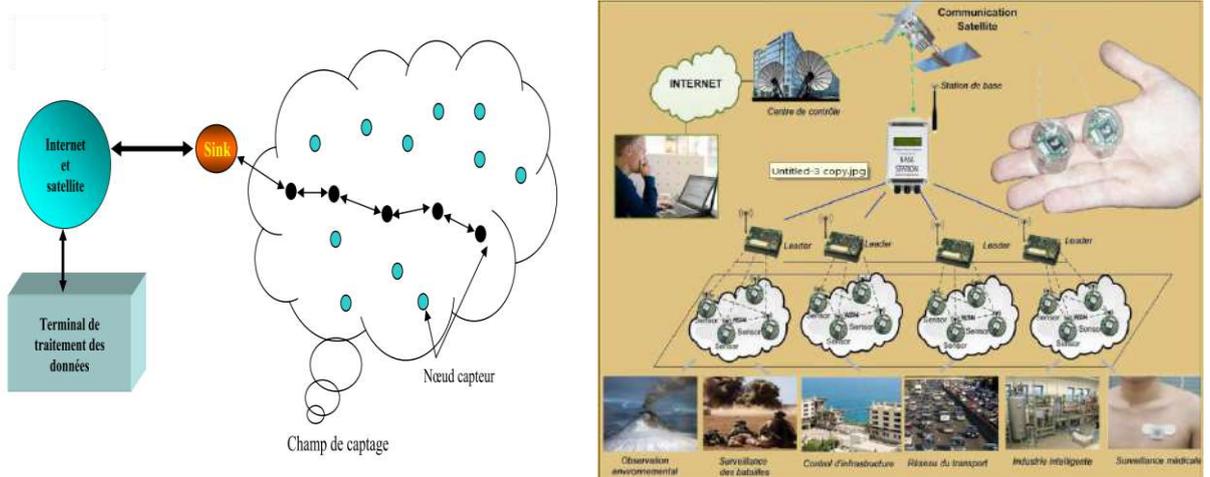


Figure 3 : Réseau de capteur sans fil (WSN).

#### IV. Les capteurs sans fil :

Un capteur sans fil est un petit dispositif à un coût raisonnable, de quelques millimètres cubes en volume. Il a pour but de relever des grandeurs physiques suivant l'environnement dans lequel il est déployé et l'objectif pour lequel il est conçu.

Un capteur sans fil est doté, principalement, de quatre unités [2] (Figure 5).

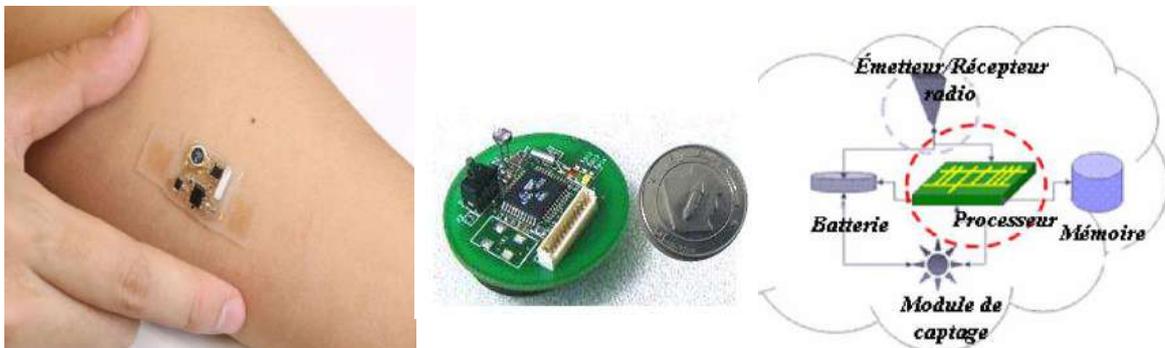


Figure 4 : Exemple des composants d'un nœud capteur sans fil

##### IV.1. Architecture d'un micro capteur :

Un nœud capteur contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité.

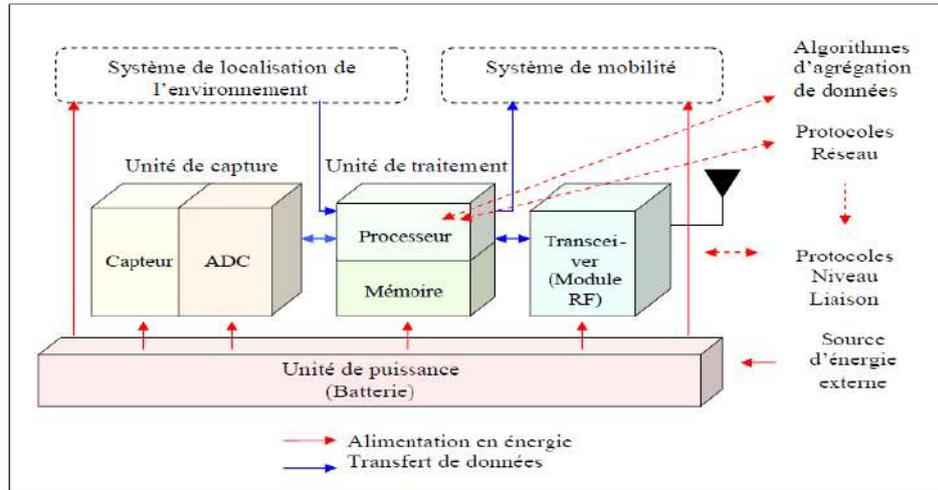


Figure 5 : Architecture d'un micro capteur.

#### IV.1.1. L'unité de captage

L'unité de captage est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique.

Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

#### IV.1.2. L'unité de traitement

L'unité de traitement comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (TinyOS par exemple). Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communication 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.

#### IV.1.3. L'unité de transmission

Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un médium sans fil. 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, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles.

Les unités de transmission de type radio fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ce qui 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 véritable défi. En effet, pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. L'autre alternative serait d'utiliser de longues antennes, mais ceci n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs

#### **IV.1.4. L'unité de contrôle d'énergie**

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et est généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs, voire du réseau en entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants. Elle est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau.

### **V. Applications des réseaux de capteurs sans fil :**

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes. Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc. Des exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines sont exposés ci-dessous.



*Figure 6 : Les différentes applications RCSF.*

### V.1. Applications militaires

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologique ou de radiations). Des tests concluants ont déjà été réalisés dans ce domaine par l'armée américaine dans le désert de Californie.

### V.2. Applications à la sécurité

La sécurité représente un domaine d'application très important pour les RCSFs. En effet, des capteurs peuvent être dans les bâtiments afin de détecter les altérations dans leur structure. En outre, Un réseau de capteurs peut constituer un système d'alarme distribué, qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur. Un tel système de sécurité sera très robuste étant donné qu'il ne contient pas de point critique pour le déconnecté. Parmi les autres

applications de sécurité, on peut citer la surveillance de voies ferrées, pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains, ou la détection de fuites d'eau dans les barrages afin d'éviter les dégâts éventuels.

### **V.3. Applications environnementales**

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés afin de surveiller des phénomènes environnementaux. Ainsi, ils sont déployés dans les forêts afin de détecter et de signaler un éventuel début d'incendie. Les capteurs peuvent aussi être semés avec les graines, afin de contrôler l'arrosage des plantes. Dans le domaine industriel, les capteurs sont généralement utilisés afin de détecter des fuites de produits toxiques, ou pour la surveillance des paramètres critiques tels que la température d'un réacteur nucléaire.

### **V.4. Applications commerciales**

Des micros-capteurs peuvent être installés dans les produits commerciaux afin de traquer le processus de stockage et de livraison de ces derniers. Dans les immeubles, le système de climatisation peut être conçu en intégrant plusieurs micro-capteurs dans les tuiles du plancher et les meubles. Ainsi, La climatisation pourra être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire.

### **V.5. Applications médicales**

On pourrait imaginer que dans le futur, la surveillance des fonctions vitales de l'être humain serait possible grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau.

Actuellement, des micro-caméras qui peuvent être avalées existent. Elles sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures. Les auteurs d'une récente étude, présentent des capteurs qui fonctionnent à l'intérieur du corps humain pour traiter certains types de maladies. Leur projet actuel est de créer une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue.

D'autres ambitieuses applications biomédicales sont aussi présentées, tel que : la surveillance du niveau de glucose, le monitoring des organes vitaux ou la détection de cancers.

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies.

## VI. La pile protocolaire adoptée par les RCSFs

Contrairement aux réseaux Ad-hoc, les réseaux de capteurs sans fil imposent des contraintes supplémentaires aux protocoles de communication. Par conséquent, le modèle traditionnel en couches (modèle OSI), ne répond pas aux exigences de ce type particulier de réseaux. En effet, les RCSFs adoptent une version simplifiée du modèle OSI, à laquelle sont ajoutées de nouvelles couches afin de remédier aux contraintes et aux limitations imposées. Ainsi, le nouveau modèle se compose de 5 couches similaires à celles du modèle OSI (physique, liaison, réseau, transport et application), et trois plans de gestion dédiés pour le contrôle d'énergie, de mobilité et des tâches particulières.

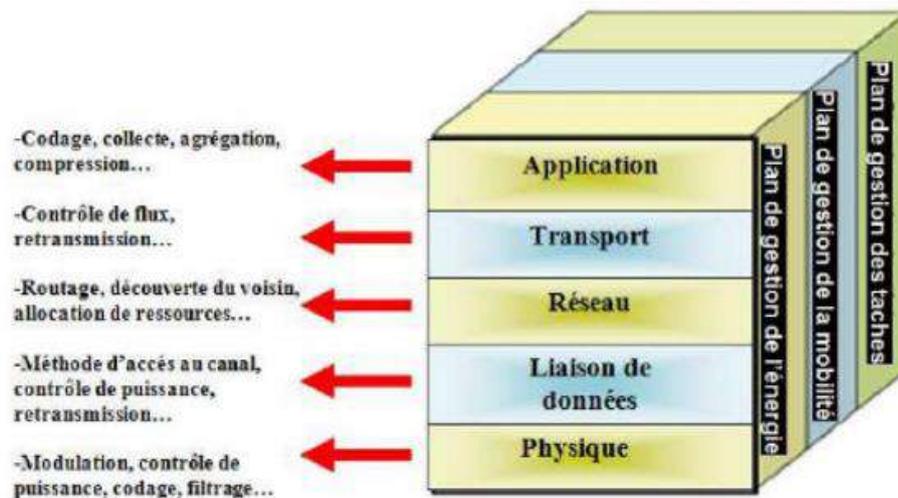


Figure 7 : La Pile protocolaire dans RCSFs.

- **La couche physique** : Comme celle du modèle OSI, cette couche est responsable de la modulation, la détection du signal et la sélection des fréquences porteuses.
- **La couche liaison** : Cette couche est chargée du contrôle d'erreurs, du multiplexage des flux de données, et le contrôle d'accès au média de transmission.
- **La couche réseau** : L'objectif de cette couche est de trouver des chemins de routage à faible coût d'énergie pour transmettre les données captées vers la station de base. Ainsi, les protocoles de cette couche doivent toujours prendre en compte les limitations en ressources des nœuds capteurs.
- **La couche transport** : Son rôle est le contrôle du flux, le découpage, l'ordonnancement et le transport des paquets de données, et la gestion des erreurs de transmission.
- **La couche application** : Afin de fournir une interface d'interaction avec l'utilisateur humain, les nœuds capteurs peuvent être dotés d'une couche application, dont le rôle est d'implémenter l'ensemble d'applications et de logiciels d'interaction.

- **Le plan de gestion d'énergie** : Les nœuds capteurs sont sévèrement limités en ressources d'énergie, qui influence directement sur la durée de vie du réseau. Ainsi, le plan de gestion d'énergie doit fournir des mécanismes de gestion efficaces pour réduire le degré de consommation d'énergie, et éliminer les sources de gaspillage de celle-ci.
- **Le plan de gestion de mobilité** : Ce plan est responsable du contrôle du mouvement des nœuds capteurs dans le cas où ils sont mobiles. Il peut par exemple enregistrer les trajectoires d'un nœud capteur afin de l'aider à se localiser.
- **Le plan de gestion de tâche** : Dans un réseau de capteurs, les nœuds peuvent effectuer des tâches qui se diffèrent en termes de consommation de ressources. Ainsi, un plan de gestion de tâche est souvent nécessaire afin de répartir d'une manière équitable les tâches sur les nœuds capteurs, et offrir ainsi une gestion efficace des ressources disponibles.

## VII. Technologies de communications sans fil

Le médium utilisé par les réseaux de capteurs sans fils médicaux est l'onde radio. Parmi les grandes normes radios qui ont été utilisées pour des applications à bases de réseaux de capteurs nous citons :

### VII.1. La norme IEEE 802.15.1 / Bluetooth

Initialement, la norme Bluetooth a été proposée pour transmettre la voix et les données [2]. Elle avait pour objectif préalable de permettre des communications sur de courtes distances avec un débit de communication limitée. Ses caractéristiques ont ainsi retenu l'attention des développeurs de capteurs. Par exemple les capteurs BtNode sont conçus pour une communication de type Bluetooth. Pour autant, le protocole Bluetooth n'est pas le protocole le plus utilisé dans les réseaux de capteurs, bien qu'il puisse répondre en partie aux problèmes de préservation de l'énergie, car il est gravement handicapé par la taille limitée du réseau qu'il peut former (8 nœuds, 1 maître et 7 esclaves).

### VII.2. La norme Wibree (Ultra Low Power Bluetooth)

Elle est considérée comme une version allégée de la norme Bluetooth fonctionnant dans la bande de fréquence des 2,4 GHz. Wibree n'utilise pas de sauts de fréquences. Cette norme prend en charge une topologie en étoile avec un maître et sept esclaves [3]. Afin de réduire la consommation d'énergie de Bluetooth, Wibree utilise une puissance de transmission et un débit symbole faibles. 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).

### **VII.3. La norme IEEE 802.15.3 / UWB (Ultra Wide Band)**

Cette norme utilise des signaux radio envoyés avec une intensité très faible et des impulsions très courtes [4]. Elle opère 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. Selon Akyildiz et al. [5], aujourd'hui, le standard IEEE 802.15.3 est devenu le candidat le plus intéressant pour fournir la qualité de service dans les réseaux WMSNs (Wireless Multimedia Sensor Networks). L'inconvénient majeur de la technologie UWB est sa faible portée de communication (environ 10 m).

### **VII.4. La norme IEEE 802.15.4 / Zigbee**

Elle est conçue pour être utilisée dans les communications à très faible puissance et sur des distances réduites. Cette technologie est utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil [6]. Par rapport à Bluetooth, cette technologie fournit une faible latence ; une couche physique « DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum » permet aux nœuds de basculer en mode sommeil sans perdre la synchronisation. Le protocole Zigbee est basé sur le standard IEEE 802.15.4 qui définit sa couche PHY et MAC et qui permet de prolonger théoriquement la durée de vie d'un nœud sur plusieurs années. L'autre point fort de ce protocole est qu'il propose le déploiement de réseau dense à plus de 65000 nœuds avec une portée de l'ordre de 100 mètres pour un débit de 250 Kbits/s. Ces caractéristiques en font aujourd'hui le principal protocole utilisé dans les réseaux de capteurs.

### **VII.5. La norme IEEE 802.15.6**

Cette norme de courte portée est utilisée par des objets ou dispositifs à ultra basse consommation, placés sur ou à proximité d'un corps humain. Elle permet un débit maximal de 10 Mbits/s. Cette norme combine des caractéristiques de sécurité, de fiabilité, de qualité de service, de basse consommation d'énergie et de protection contre les interférences, ce qui la rend adaptée de multiples applications de réseaux radio corporels (WBAN, Wireless Body Area Networks) [108].

La norme IEEE 802.15.6 définit une couche MAC unique et trois couches physiques différentes utilisables en fonction des applications visées. La couche NB PHY (NB pour Narrow Band) autorise des transmissions à bande étroite dans les bandes ISM (Industrial, Scientific and Medical) traditionnelles avec des débits pouvant atteindre 500 Kbits/s. La couche physique UWB PHY s'appuie sur la technologie radio ultralarge bande (UWB), pour

cela elle est appelée UWB PHY. Elle permet des débits allant jusqu'à 10 Mbits/s dans des bandes de fréquences situées autour de 4 GHz et 8 GHz. Enfin, la couche HBC PHY (HBC pour Human Body Communication) s'inspire du standard de communication en champ proche et exploite les bandes 16 MHz et 27 MHz.

## VII.6. La norme IEEE 802.11x/WiFi

Le protocole de communication WiFi est le protocole le plus utilisé pour toutes les applications sans fil. Il offre une large bande passante (de 11 à 320 Mbits/s) ce qui a permis de démocratiser l'utilisation de la technologie sans-fil dans les réseaux classiques WLANs. Les premiers capteurs sans-fil ont eu recours à ce protocole pour permettre la communication entre nœuds. Cependant, le standard de communication WiFi n'apparaît plus actuellement comme une solution viable pour les réseaux de capteurs sans fil, du fait d'un besoin énergétique trop important pour son utilisation. La durée de vie des capteurs sans fil alimentés par des piles ne dépasse que rarement quelques heures. C'est pourquoi, les applications de capteurs à base de communication sans fil WiFi sont très peu répandues.

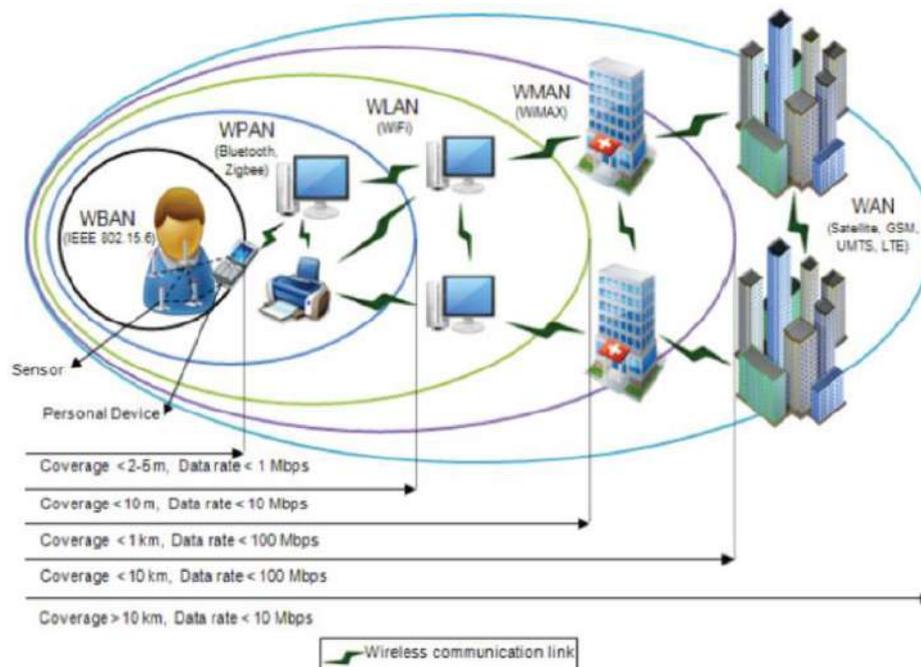
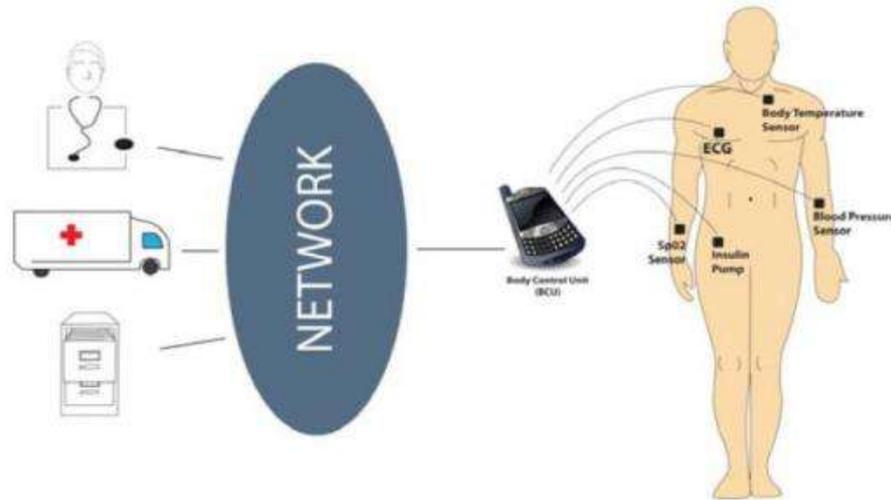


Figure 8 : Les Technologies de communications sans fil. [50, 51].

## VIII. Les Réseaux WBAN (Wireless Body Area Network)

### VIII.1. Définition

Wireless Body Area Networks (WBAN) : un réseau de capteurs corporels sans fil 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 à partir du corps humain ou de son environnement. 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 personnel. Les WBANs ont plus d'exigences en termes de sécurité et de miniaturisation des capteurs par rapport aux WSNs.[10]



*Figure 9: Wireless Body Area Networks.*

### VIII.2. Classification des WBAN :

Les applications de WBAN couvrent un large domaine tel que militaire, la santé, le sport, le divertissement et de nombreux autres domaines.

#### VIII.2.1. Classification de IEEE 802.15.6

IEEE 802.15.6 catégorise les applications de WBAN en médical et non médical

##### 1) WBAN médical

Les applications médicales de WBANs permettent une surveillance continue des attributs physiologiques, comme la pression artérielle et la température corporelle. Dans les cas où des anomalies sont détectées, les données collectées par les capteurs peuvent être envoyées à une passerelle, tel qu'un Smartphone. La passerelle délivre ses données via un réseau cellulaire ou Internet à un tiers distant, comme un centre d'urgence ou un médecin sur la base duquel une action peut être prise [19, 20]. Selon le type du capteur utilisé ces applications peuvent être classées en trois sous-catégories comme suit :

**a) WBAN portable**

Par exemple l'activité des soldats dans le champ de bataille peut être surveillé de plus près par WBANs. Ceci peut être réalisé grâce à un WBAN constitué de caméras, capteurs biométriques, GPS et réseau sans fil pour la communication avec d'autres soldats et un centre de contrôle. Toutefois, afin d'éviter des embuscades, un canal de communication sécurisé devrait exister entre les soldats [21]. WBANs peut également être utilisé par les policiers et les pompiers [18]. Un autre exemple, avec une Gluecocellphone qui est un Smartphone avec un module de glucose peut être utilisé chez les patients atteints de diabète. Le Smartphone reçoit un diagnostic de glucose à partir du module de glucose qui peut ensuite être stocké ou envoyé à un médecin pour l'analyse [23].

**b) WBAN implantable**

Cette classe d'applications est basée sur les nœuds implantés dans le corps humain soit sous la peau ou dans le flux sanguin. Par exemple pour les maladies cardiovasculaires, l'infarctus du myocarde (IM) peut être considérablement réduit par la surveillance des événements épisodiques et d'autres conditions anormales grâce à la technologie WBAN. Des capteurs capables de surveiller les cellules cancéreuses dans le corps humain permettront aux médecins de continuer à diagnostiquer la tumeur, pour les cancéreux.

**2) WBAN non médical**

Cette classe d'applications implique le streaming vidéo tels que la capture d'un clip vidéo par l'appareil photo dans un téléphone cellulaire. Le streaming audio est également possible grâce à la communication vocale pour les casques, par exemple écouter de la définition de l'art au musée ou en écoutant les informations de programmation de bus sur l'arrêt de bus, la multidiffusion pour les conférences, la navigation échantillons de musique dans un magasin de CD de musique. Cette catégorie comprend également le transfert de flux qui est utilisé pour le contrôle à distance des appareils de divertissement, le service de divertissement à base d'information du corps, l'identification, la détection de l'émotion et de surveiller les choses oubliées par l'envoi d'une alerte au propriétaire.

En outre, cette catégorie comprend des applications de jeux et les réseaux sociaux. Les appareils tels que des microphones, lecteurs MP3 et appareils photo peuvent être utilisés comme dispositifs intégrés dans WBANs. Ils peuvent être utilisés dans la réalité et dans les jeux virtuels (contrôle du jeu avec un geste de la main, jeu mobile via le mouvement du corps et jeu de monde virtuel).

Off-corps capteurs sont capables de détecter une situation d'urgence non médicale comme le feu ou une fuite de gaz inflammable dans la maison, que doivent communiquer de

toute urgence ces informations à des appareils portés sur le corps pour avertir l'utilisateur de l'état d'urgence [23].

Une autre application clé de WBAN est l'authentification sécurisée, cette application fait référence à l'utilisation des biométries à la fois physiologiques et comportementales tels que la reconnaissance de l'iris, les empreintes digitales et les modèles du visage [15].

Catégorie	Type	Exemple
<b>Médical</b>	WBAN portable	Evaluation de la fatigue du soldat
		Entraînement sportif
		Asthme
	WBAN implantable	Surveillance de la sante en temps réel
		Maladies cardiovasculaires
		Détection du cancer
	WBAN pour le Contrôle a distant	Ambient Assisted Living (AAL)
		La surveillance du patient
		Les systèmes télémédecine
<b>Non médical</b>	/	Streaming en temps réel
		Divertissement
		Urgence non médical

Tableau 1: Classification des applications WBAN selon IEEE 802.15.6 [18]

**VIII.2.2. Classification par position de capteur :**

Toutefois, les exigences technologiques de WBANs sont spécifiques à l'application.

Une autre classification des applications de WBAN basé sur le positionnement du capteur sur le corps, IN/ON-Body, l'ensemble de ces applications, sont présentés dans le tableau 02

Type	Nœud capteur	Débit de données	Durée de vie (par appareil) % par temps	Consommation d'énergie	QoS (sensible à la latence)	Confidentialité
IN-Body	Capteur de glucose	Peu Kb/s	< 1%	Extrêmement bas	Oui	Haute
	Pacemaker	Peu Kb/s	< 1%	Bas	Oui	Haute
	Capsule endoscopique	> 2 Mb/s	< 50 %	Bas	Oui	Moyen
ON-Body Médical	ECG	3 Kb/s	< 10 %	Bas	Oui	Haute
	SpO2	32 Kb/s	< 1%	Bas	Oui	Haute
	Tension artérielle	< 10 b/s	< 1%	Haute	Oui	Moyen

Tableau 02: IN /ON-Body application de WBAN [24]

**VIII.3. Architecture d'un WBAN**

Le schéma de la figure ci-dessous illustre l'architecture générale d'un système de surveillance médicale et de soin à distance basé sur un réseau WBAN.

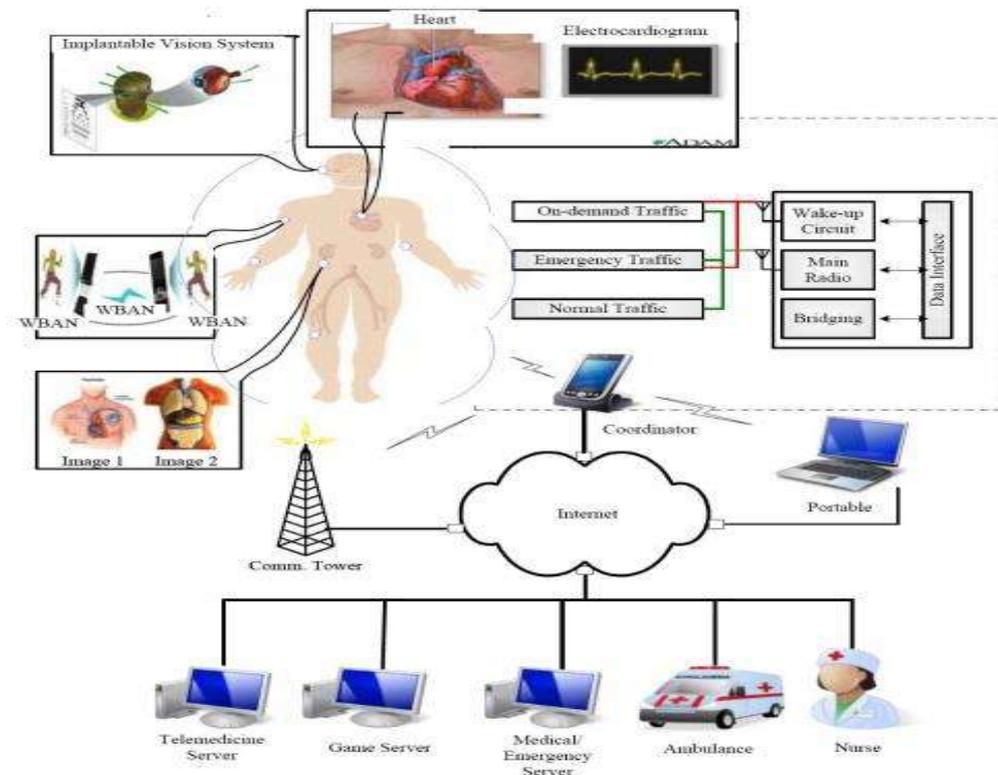


Figure 10 : Une infrastructure de m-health en temps réel pour la réhabilitation des patients

Le système est constitué d'un réseau WBAN, un réseau externe et le serveur médical.

Le réseau WBAN permet de collecter des informations médicales sur le sujet et de transmettre ces informations au serveur médical via le réseau externe qui peut être filaire ou sans fil (Internet, GSM, ...etc.). Le nœud puits joue le rôle d'une passerelle entre le réseau WBAN et le réseau externe. Le serveur médical stocke, traite et gère efficacement l'énorme quantité de données biomédicales des patients. Ces données médicales sont ensuite observées et analysées par un médecin.

**VIII.4. Comparaison entre les réseaux WBAN et les réseaux de capteurs sans fil (WSN).**

Catégorie	Critère de comparaison	WSN	WBAN
Réseau	Echelle	Dizaines de mètres (surveillance d'environnement)	Dizaines de centimètres (corps humain)
	Topologie	Fixe ou statique	Variable (mouvement de corps)
	Débit	Homogène	Hétérogène
	Source d'énergie	Accessible et remplacé facilement et fréquemment	Inaccessible et difficile à remplacer dans une
	La récupération d'énergie	L'énergie solaire et éolienne	Motion et la chaleur du corps
	Sécurité	Faible	Haute
	Perte de données	Non considéré	Plus significatif (QoS et la livraison de données en temps
	La précision des résultats	Par nœuds redondance	Grâce à la précision de nœud
Capteur	Défaillance	Non considéré	Considééré (devrait être très faible)
	Type	Homogène	Hétérogène
	Etat	Statique	Dynamique
	Nombre	Plusieurs nœuds redondants	Peu, limité dans l'espace
	Taille	Petit (préféré)	Petit (essentiel)
	Taches	Tache défié	Des taches multiples
	Durée de vie	Plusieurs années / mois	Plusieurs années / mois avec capacité de la batterie plus
	Remplacement	Facile	Difficile (Ex. nœuds implantés)
	Biocompatibilité	Non considéré dans la plupart des applications	A la plupart des implants et des capteurs externes
	La précision des résultats	Grâce au nœud redondance	Grâce à la précision de nœud
Technologies sans fil		Bluetooth, ZigBee, 802.11, GPRS, RF	802.15.6, ZigBee, UWB, Zarlink , Rubees

Tableau 03 : WBANs vs. WSNs

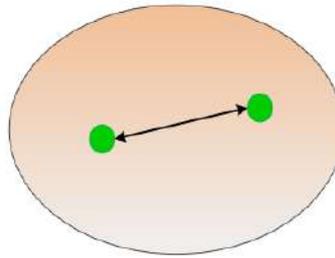
## VIII.5. Topologies des réseaux WBAN

Dans cette section, nous décrivons les topologies les plus utilisées pour le déploiement des réseaux WBAN. Nous distinguons les topologies suivantes : point-à-point, étoile, maille et arbre.

### VIII.5.1. Topologie point à point.

C'est la topologie la plus simple dans les réseaux. Cette topologie est destinée à une seule liaison, par exemple entre un collecteur de données et un nœud capteur.

Le principal avantage de cette topologie est la simplicité qui permet souvent l'utilisation d'un protocole simple, la faible latence et le débit élevé. Les inconvénients comprennent ses fonctionnalités limitées ainsi que sa faible couverture.

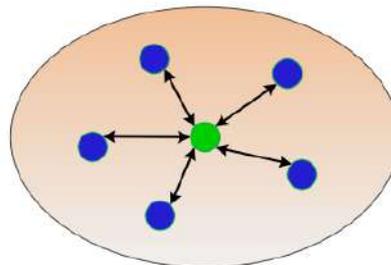


*Figure 11: Topologie point à point*

### VIII.5.2. Topologie en étoile

Une topologie dans laquelle tous les nœuds sont connectés par l'intermédiaire d'un nœud central est une topologie en étoile (Star en anglais). Ces nœuds peuvent seulement envoyer ou recevoir un message à ou de l'unique nœud central. Il ne leur est pas permis de s'échanger des messages directement entre eux. Le nœud central joue le rôle d'un relais entre les différents nœuds. À ce jour, cette topologie est la plus proposée et utilisée pour les réseaux WBAN.

Cette topologie présente des avantages qui peuvent être résumés par 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.

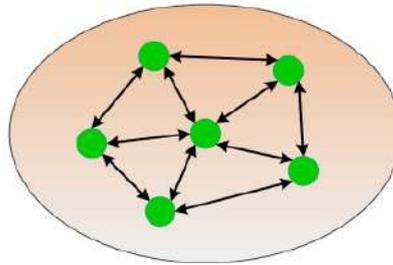


*Figure 12: Topologie en étoile*

### VIII.5.3. Topologie en maille

Une topologie avec une connectivité complète entre les nœuds est une topologie maillée (Mesh en anglais). Dans ce cas (dit « communication multi-sauts »), tout nœud peut échanger avec n'importe quel autre nœud du réseau s'il est à la portée de transmission. Un nœud voulant transmettre un message à un autre nœud hors de sa portée, peut utiliser un nœud intermédiaire pour véhiculer son message au 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.

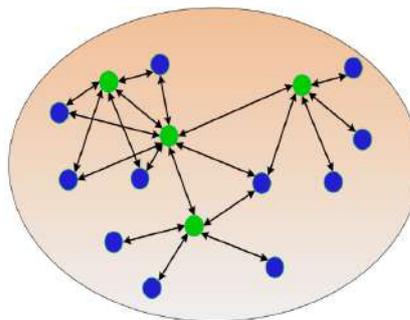


*Figure 13 : Topologie en maille*

### VIII.5.4. Topologie Hybrid

Une topologie hybride est une combinaison des deux topologies d'étoile et de maille. Un exemple de topologie hybride est illustrée à la figure 12 Le principal avantage de la topologie hybride est la possibilité d'extension facile, les nouveaux nœuds peuvent être ajoutés à tout moment.

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 bande passante élevée et une faible latence. Mais toutefois, les nœuds pères peuvent consommer beaucoup d'énergie.



*Figure 14 : Topologie Hybrid*

VIII.6. Caractéristiques et exigences des WBANs :

Caractéristique	Description	
Type de nœud	Fonctionnalité (18, 25, 26)	Dispositif personnel (PD)
		Capteur
		Actionneur
	Implémentation (IEEE 802.15.6) [19, 27]	Dans le corps (In-body)
		Sur le corps (On-body)
		Autour de corps (body)
	Rôle	Coordinateur
		Fin (End)
		Relais (Relay)
Nombre de nœuds	Dans les standards IEEE	De quelques-uns communiquant avec un Sink à dizaines à des centaines communiquant avec une passerelle vers l'Internet [28-31]
	Dans une application médical	6 à 256 nœuds [31]
	Dans un porté de 3m	Jusqu'à 10 piconets par personne avec 256 nœuds pour chaque piconet dans un cube de 6m <sup>3</sup> [32-34]
	Adresse WBAN [WBAN ID]	1 Octet x00 à xFF (0 - 255) [35]
Débit [36-38]	ECG	71 à 288 kb/s
	EMG	43.2 kb/s
	EEG	320 kb/s
	Blood saturation	16 b/s
	Glucose monitoring	1600 b/s
	Température	120 b/s
	Motion sensor	35 kb/s
	Cochlear implant	100 kb/s
	Artificial retina	50-700 kb/s
	Audio	1 Mb/s
Voice	50-100 kb/s	

Energie	Captage	Une combinaison de faible consommation d'énergie et de récupération d'énergie (générateur thermoélectrique (TEG) [40]) est la solution optimale pour atteindre un WBAN autonome [9, 39].
Autonomie et Convivialité [42].	Auto-organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaque fois qu'un nœud est mis sur le corps et allumé, il devrait être en mesure de rejoindre le réseau et mettre en place des routes sans aucune intervention extérieure.</li> <li>• Le problème de l'adressage des nœuds : une adresse peut être configuré au moment de la fabrication (l'adresse MAC) ou au moment de l'installation par le réseau lui-même.</li> </ul>
	Auto entretien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En outre, le réseau devrait être rapidement reconfiguré, pour ajouter de nouveaux services.</li> <li>• Lorsqu'un itinéraire échoue, un chemin de secours devrait être mis en place.</li> </ul>
	L'emplacement exact d'un nœud	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par exemple un capteur cardiaque doit évidemment être placé dans le voisinage du cœur, un capteur de température peut être placé presque partout.</li> </ul>
	Mobilité.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro-mobilité (interne): Mouvement des organes de corps.</li> <li>• Macro-mobilité (externe) : mouvement de corps entier (a marche, la course)</li> </ul>
Sécurité et confidentialité [43]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cryptage de données dans les WBANs et sur l'internet.</li> <li>• Authentification.</li> <li>• Accessibilité de réseau.</li> </ul>	

Tableau 04 : Caractéristiques et exigences de WBAN

**VIII.7. Les communications dans les réseaux WBAN**

La Figure Ci-dessous illustre une architecture générale d'un système WBAN (Wireless Body Area Network) de surveillance médicale, où plusieurs types de capteurs corporels envoient leurs données mesurées à un serveur par le biais d'une connexion sans fil. 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.

Nous décomposons les communications dans un système BAN en trois composantes [107]: Communications «Intra-BAN», Communications «Inter-BAN» et Communications « Au-delà de BAN».

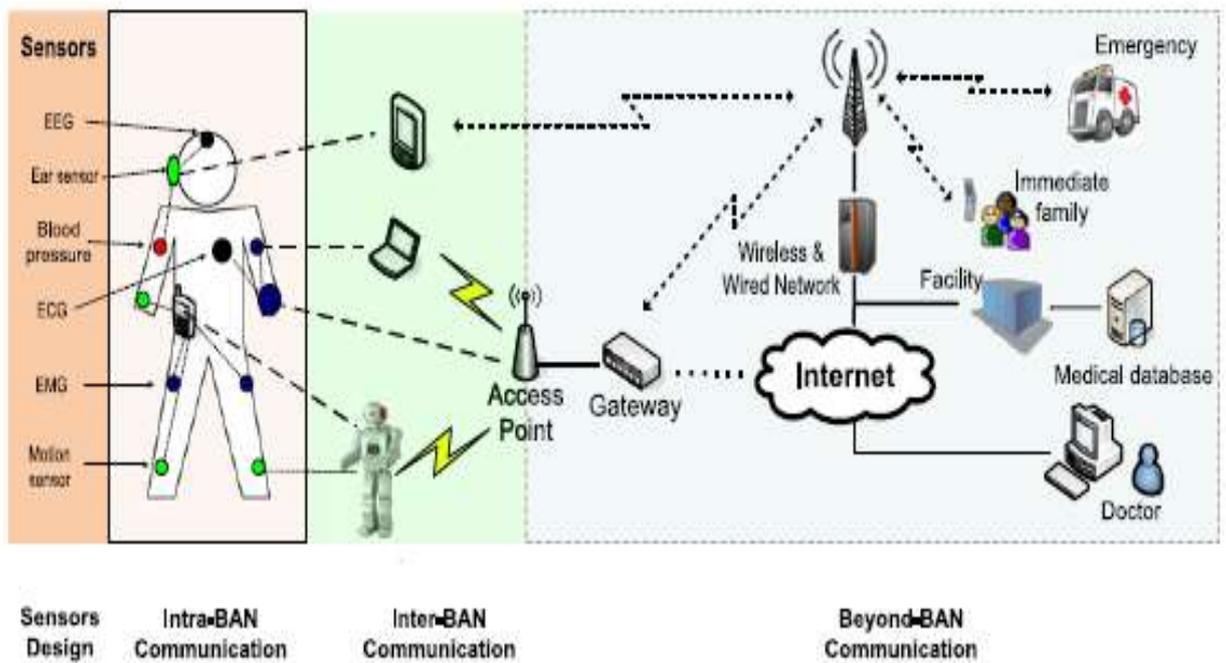


Figure 15 : Architecture générale des communications dans un système BAN[107]

**VIII.7.1. Communications « Intra-BAN »**

Concerne les communications qui se déroulent autour du corps humain. Ce type de communications se compose des communications entre les différents capteurs corporels ainsi des communications entre les capteurs corporels et le nœud de collecte. Ce dernier peut être un dispositif caractérisé par une puissance de calcul et une réserve d'énergie plus importante par rapport aux capteurs corporels.

### **VIII.7.2. Communications « Inter-BAN »**

Ce type se compose des communications entre le nœud de collecte et un ou plusieurs points d'accès. Les points d'accès peuvent être déployés dans le cadre de l'infrastructure, ou être placés stratégiquement dans un environnement dynamique pour gérer les situations d'urgence.

### **VIII.7.3. Communications « Au-delà de BAN »**

Ce type se compose des communications entre le point d'accès et l'équipe médicale localisée par exemple dans un hôpital et cela via le réseau Internet ou un réseau cellulaire. Les communications « Au-delà de BAN » peuvent améliorer l'application de la surveillance médicale en permettant aux personnels de la santé (médecins et infirmières) d'accéder à distance aux informations médicales des patients et d'intervenir dans les cas d'urgences.

## **VIII.8. Contraintes des réseaux WBAN**

Un réseau de capteurs sans fil médicaux est un réseau spécial qui a un certain nombre de contraintes par rapport à un réseau informatique classique. Ces contraintes sont le résultat des limitations concernant la mémoire du capteur, sa réserve énergétique, sa capacité de traitement ainsi que l'utilisation d'une communication sans fil. Les contraintes dans un réseau de capteurs sans fil médicaux sont classées en deux catégories : contraintes matérielles et contraintes réseau

### **VIII.8.1. Contraintes matérielles**

Ces contraintes sont liées aux capacités matérielles et physiques des capteurs, ce qui représente un handicap pour les besoins en sécurité qui nécessitent en général des ressources supplémentaires.

- Mémoire et espace de stockage limités.
- Energie Limitée
- Capacité de calcul limitée
- Faible débit

### **VIII.8.2. Contraintes réseaux**

Les communications sans fil sont en général incertaines car des paquets peuvent être perdus ou endommagés à cause de la transmission radio. Ce manque de fiabilité dans la communication constitue un problème additionnel pour les nœuds capteurs.

## **IX. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fils en général et sur les réseaux de capteurs sans fil médicaux en particulier, nous avons parlé des systèmes WBAN où nous avons fait une comparaison entre les réseaux WBAN et WSN. Puis nous avons décrit les sous-systèmes constituant un système WBAN de surveillance médicale à distance ainsi que les topologies les plus utilisées pour le déploiement des réseaux WBAN.

Ensuite nous avons donné une définition technique et l'architecture d'un noeud capteur, Après nous avons présenté la Classification et l'architecture des communications dans les systèmes WBAN.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons fait une comparaison entre les réseaux WBAN et WSN, Puis nous avons décrit les différentes Topologies et les Caractéristiques et exigences des WBANs ensuite Les communications qui peuvent être nous confrontent dans les réseaux WBAN.

Finalement, nous avons parlé des contraintes pour les systèmes WBAN dans les applications de surveillance médicale

Dans le chapitre suivant, nous allons faire un état de l'art sur Les protocoles de routage dans les réseaux WBANs.

# **CHAPITRE II**

## **Les protocoles de routage dans les réseaux WBANs**

## **I. Introduction :**

La communication dans les réseaux WBANs dépend du protocole de routage utilisé. Chaque nœud après la capture des grandeurs à mesurer achemine le paquet en fonction du protocole de routage mis en œuvre.

Cependant le développement d'un protocole de routage pour les WBANs représente une tâche difficile en raison de plusieurs défis comme les mouvements du posturaux de corps, la consommation d'énergie, la durée de vie du réseau ...etc.

Dans ce chapitre nous allons présenter les défis des réseaux WBAN, la classification des protocoles de routage utilisés dans les WBANs.

## **II. Les défis de routage dans WBANs :**

Les applications médicales d'un système de réseaux de capteurs sans fil imposent des exigences strictes en matière de fiabilité du système, de qualité de service, de consommation d'énergie, de vie privée et de sécurité des données. Donc, les réseaux de capteurs médicaux WBAN présentent plusieurs défis à relever. Parmi ces défis nous citons :

### **II.1. Mouvements du posturaux de corps**

La mobilité des nœuds conduit à des changements fréquents dans la topologie réseau, qui augmente la complexité de gestion d'énergie et le traitement de la qualité de service (QoS). En outre, la qualité de la liaison entre les nœuds dans WBANs varie en fonction du temps, en raison de divers mouvements du posturaux de corps [65]. Par conséquent, les protocoles de routage proposés doivent être adaptable à ces différents défis. À cet égard, les auteurs de [66] ont considéré WBANs pour être dans la catégorie de Réseau tolérant aux délais DTN (Delay Tolerant Networks) en raison de sa déconnexion fréquente résultant aux mouvements du posturaux de corps. En outre, certaines parties du corps et des vêtements conduisent à un blocage du signal qui intensifie l'atténuation RF. En plus, le modèle de mobilité WBANs change dans les dizaines de centimètres alors que dans WSNs est de l'ordre de mètres et des dizaines de mètres.

### **II.2. La consommation d'énergie**

Le principal facteur limitant la durée de vie d'un réseau de capteurs est la consommation d'énergie. Donc l'optimisation de l'énergie est un défi qui est rencontré dans presque tous les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil, parmi lesquelles les applications médicales. Les capteurs actuels ont des périodes de veille durant leur inactivité pour préserver leur batterie. Les sources de consommation d'énergie dans un nœud capteur proviennent

principalement de l'unité de captage, de l'unité de traitement des données et de l'unité de communications (transmission et réception sans fils) [12].

Les communications sont les actions qui coûtent le plus cher en termes d'énergie et les calculs le sont mais avec une moindre importance. Il est donc fortement nécessaire de limiter le nombre de communications entre capteurs et si possible la quantité de calculs [29].

### II.3. Température et interférence

Afin de minimiser les interférences et d'éviter un échauffement des tissus, la puissance d'émission de nœuds doit être extrêmement faible et le confort de l'être humain doit être pris en compte dans le protocole de routage proposé [24].

### II.4. La durée de vie de réseau

La durée de vie du réseau dans WBANs est désignée comme l'intervalle de temps entre le moment où le réseau commence au moment où le réseau est significativement endommagé, ce qui conduit à divisant le réseau de telle sorte que la destination ne peut pas être atteint. En plus le remplacement et la recharge de la batterie est impossible dans les capteurs implants, la durée de vie du réseau est de plus d'importance dans WBANs par rapport au WPAN et WSNs [36].

### II.5. Tolérance aux pannes

Dans les réseaux de capteurs sans fil, un ou plusieurs capteurs peuvent ne pas fonctionner correctement, car les capteurs sont des entités sensibles aux altérations d'états comme des phénomènes climatiques (humidité, chaleur, etc.) ou du fait d'une batterie faible. Dans ces cas, le réseau doit être capable de détecter ce type d'erreur et d'y remédier, afin de transmettre l'information et permettre au réseau d'être toujours opérationnel [29].

### II.6. Fiabilité et sécurité

Les applications médicales imposent des exigences strictes en termes de fiabilité du système de bout en bout et de livraison des données [13]. La communication des données médicales entre les capteurs d'un système WBAN est soumise à des exigences de sécurité telles que la disponibilité du réseau, la confidentialité, l'authenticité, l'intégrité et la fraîcheur des données.

- **La disponibilité du réseau :** le réseau doit pouvoir être disponible à tout instant
- **La confidentialité des données :** le réseau doit s'assurer que les données transmises soient confidentielles et ne puissent être lues par des dispositifs ou personnes autres que les concernés.

- **L'authentification** : l'authentification des capteurs est nécessaire pour s'assurer que l'identité déclarée par un capteur est bien celle du capteur déclarant.
- **L'intégrité des données** : les données circulant sur le réseau WBAN ne doivent pas pouvoir être altérées au cours de la communication.
- **La fraîcheur des données** : il faut s'assurer que la donnée transmise corresponde à un état présent, c.à.d. que ces données ne reflètent pas un état passé [30].

## II.7. Le porté de transmission

Le faible porté de transmission des technologies radio utilisés dans WBANs conduit à une déconnexion fréquente entre les capteurs WBANs [66]. En plus dans les cas où le porté de transmission des capteurs est inférieur à une valeur de seuil, il y a moins de choix pour le routage vers les capteurs adjacents est possible qui conduit à un plus grand nombre de transmissions menant à l'augmentation globale de la température. En outre, plus le nombre de voisins est important, le nombre de sauts pour un paquet arriver à sa destination sera augmenté, ainsi, les paquets vont prendre plus de temps pour arriver à la destination qui conduit à une augmentation moyenne de la température globale [67].

## II.8. Limitation du nombre de sauts

Selon le standard IEEE 802.15.6 pour WBANs [68], un ou deux sauts sont autorisés dans WBANs. Alors que la transmission multi sauts fournit des liens plus étroits menant à l'augmentation globale de la fiabilité du système. A d'autre part, quand le nombre de sauts augmente, la consommation d'énergie sera élevé proportionnellement [69]. Cependant, la limitation du nombre de sauts n'a pas été prise en compte dans la plupart des protocoles de routage WBAN.

## II.9. la diversité de l'environnement

Des applications spécifiques de WBANs peuvent nécessiter la collection des données hétérogènes provenant de capteurs hétérogènes en terme de débits de données, énergie disponible, capacité de mémoire, ...etc. Par conséquent, les protocoles de routages basés sur la qualité de service en WBANs peuvent être assez difficiles.

## II.10. Limitation des ressources

En raison de la petite forme du capteur dans WBAN (pour faciliter son déploiement dans, sur ou autour de corps humain et assurer un certain confort aux personnes intéressés), la capacité de mémoire, l'énergie, la bande passante sont strictement limitées. Par conséquent, les nœuds WBAN sont possible devenus à l'échec en raison de cette limitation, ce qui à son tour conduit à la paralysie totale du réseau et à une dégradation significative de la qualité de service.

### III. Classification des protocoles de routage dans les WBANs

#### III.1. Protocoles basés sur le clustering

La première classe de protocoles de routage dans WBANs est les protocoles de routage à base de cluster qui divisent les nœuds de WBAN en différents groupes et assignent un cluster-head pour chaque groupe. Les données sont transmises à travers les clusters-heads depuis les capteurs vers le Sink. Le but de cette classe de protocoles de routage est de diminuer le nombre de transmissions directes des capteurs au Sink (la station de base). Cependant, l'overhead (le coût) et le delay (**délai**) relatif à la sélection du cluster-head sont les principaux inconvénients de ces protocoles.

##### III.1.1. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy LEACH :

Deux grandes approches sont dérivées de ce type de protocoles à savoir : chaîne-based approach (approche chaînée) et cluster-based approach (approche à grappe). LEACH est considéré comme étant le premier protocole de routage hiérarchique basé sur la seconde approche. Il est aussi l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusters-heads locaux comme passerelle pour atteindre la destination. [107]

Dans le chapitre 3, nous expliquerons l'architecture et l'algorithme détaillé du protocole LEACH et nous présenterons les avantages et inconvénients de ce dernier.

##### III.1.2. Any Body [70] :

AnyBody [61] est un protocole d'auto-organisation basée sur LEACH et destiné pour les WBANs. Il s'articule sur l'approche de clustering afin de réduire le nombre de transmissions directes vers le SINK. Comme dans LEACH, une cluster-head est choisie de manière aléatoire dans chaque cluster à des intervalles de temps réguliers pour équilibrer la dissipation d'énergie entre les nœuds du réseau.

##### III.1.3. Hybrid Indirect Transmission (HIT)

Culpepper et al [72, 73] ont proposé un protocole basé sur le Clustering qui réduit le nombre de transmissions directes à le Sink et utilise des transmissions multi-hop, parallèle et indirectes à la fois au sein d'un cluster et entre plusieurs clusters adjacents. L'analyse de HIT et HITm (HIT avec plusieurs clusters) ont montré un petit Delay de réseau, une bonne efficacité énergétique et une haute durée de vie du réseau.

### III.2. Protocoles probabilistes

Les protocoles de routage probabilistes sont mis à jour périodiquement leur fonction de coût basée sur les informations d'état des liens et établir leur route parmi les routes avec le coût minimum. Cependant, ces protocoles nécessitent un grand nombre de transmissions pour la mise à jour ses informations d'état de liens.

#### III.2.1. Prediction-based Secure and Reliable routing (PSR)

PSR est un Framework de routage distribué pour les WBANs proposé par Liang et. al [79] qui est basé sur une méthode qui consiste à attribuer à chaque nœud ( $n_i$ ) une matrice  $M_i$  dans laquelle sont stockés les mesures de qualité de lien entre nœud lui-même et tous les autres nœuds du réseau au cours des dernières time slots. Cependant, ce protocole n'est pas extensible et ne convient que pour les applications de WBAN avec petit nombre de nœuds en raison de son coût énorme pour la mise à jour de sa matrice d'état des liens.

#### III.2.2. Probabilistic Routing with postural link costs (PRPLC)

PRPLC [80] définit un facteur de lien de Likelihood LLF (Link Likelihood Factor), appelé :  $P_{i,j}^t$  tel que  $0 \leq P_{i,j}^t \leq 1$  qui dénote la probabilité pour le lien  $L_{i,j}$  entre le nœud  $i$  et  $j$  à être connecté pendant un time slot discret  $t$ . LLF est défini de manière pour être dynamiquement mis à jour après la  $t^{\text{ème}}$  time slot comme suit:

$$P_{i,j}^t = \begin{cases} P_{i,j}^{t-1} + (1 - P_{i,j}^{t-1})\omega_{i,j}^t & \text{si } L_{i,j} \text{ est connecté} \\ P_{i,j}^{t-1}\omega_{i,j}^t & \text{si } L_{i,j} \text{ est déconnecté} \end{cases}$$

Lorsqu'un nœud  $i$  souhaite acheminer les données vers un nœud  $d$  (Sink) à travers un nœud  $j$ , le nœud  $i$  transmet le paquet au nœud  $j$  pendant le time slot  $t$ , si et seulement si :

$P_{i,d}^t \leq P_{j,d}^t$  est valide. En outre, chaque nœud met à jour ses valeurs de  $P_{i,j}^t$  avec tous les nœuds du réseau à travers ses messages Hello périodiques qui sont également utilisés pour envoyer les valeurs de  $P_{i,d}^t$  avec le nœud destination commune  $d$ .

#### III.2.3. Distance Victor routing with postural link costs (DVR- PLC)

DVR-PLC [81] propose que tous les nœuds conservent le coût du trajet cumulatif au nœud commun Sink. Comme PRPLC, ce protocole choisit les chemins ayant l'haute probabilité pour diminuer le délai de bout en bout et de réduire le délai de stockage intermédiaire.

Avec la même procédure de routage utilisé par PRPLC, DVR-PLC vise à minimiser le coût cumulé de bout en bout, tandis que PRPLC vise le délai de bout en bout.

### III.2.4. On-Body Store and Forward Routing (OBSFR)

OBSFR [82] tente d'éviter le partitionnement de réseau qui peut survenir en permettant à chaque nœud de maintenir la source-id, seq-No et la liste des nœuds-ids qui démontrent son chemin bien qu'il est loin de nœud source. Par conséquent, une fois qu'un paquet arrive à un nœud pour la première fois, le nœud continue à stocker le paquet jusqu'à ce qu'il atteigne au moins un nœud qui ne figure pas dans la liste nœuds-ids du paquet, dans ces cas, le nœud i diffuse le paquet au nœud qu'il a rencontré, et le supprime de sa mémoire tampon. Comme dans les inondations régulières, le nœud i ignore la réception du même paquet.

Cependant, ce type de routage est uniquement applicable aux réseaux à petite taille et non évolutive en raison de son exigence d'ajouter de dizaines des ids à l'entête des paquets.

### III.2.5. (ETPA) Energy Efficient Thermal and Power Aware Routing protocol

Ce protocole [83] calcule une fonction de coût pour router ses données en termes de température de nœuds, l'énergie disponible et la puissance reçue à partir des nœuds adjacents. Afin d'éviter idllelistening et de diminuer les interférences.

Caractéristique	PSR	PRPLC	DVR- PLC	OBSFR	ETPA
Delay	Haute	Haute	Haute	Faible	Haute
Durée de vie de réseau	Faible	Haute	Haute	Faible	Haute
Taux de livraison de paquets (PDR)	Jusqu'à 80%	Jusqu'à 88%	Jusqu'à 89%	Jusqu'à 92%	Jusqu'à 95%
Mobilité	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Consommation d'énergie	Haute	Faible	Faible	Haute	Faible

Tableau 05 : Comparaison des Protocoles de routage probabiliste dans WBAN

### III.3. Protocoles inter-couche (cross-layer)

Le design Cross-Layer est un moyen d'améliorer l'efficacité et l'interaction entre les protocoles dans un WBAN en combinant les défis de la couche réseau avec d'autres couches de la pile protocolaires.

### III.3.1. Wireless Autonomous Spanning Tree Protocol (WASP)

Le protocole WASP [74] définit un spanning tree (arbre de recouvrement) et divise l'axe des temps dans des slots, dite aussi WASP-cycles, de manière distribuée pour fournir l'acheminement du trafic et l'accès au support en utilisant le même spanning tree qui se traduit par meilleure consommation d'énergie et haute débit.

Chaque nœud attribue un message unique WASP-scheme et l'envoie à ses nœuds descendants (enfants) pour les informer quand ils sont autorisés à utiliser son lien. Par conséquent, ces messages permettent aux nœuds ascendants (parents) de contrôler le trafic et d'augmenter les ressources qui minimisent l'overhead de coordination. Les enfants réagissent au système en envoyant leur propre WASP- scheme sur la base du WASP- scheme de Sink et les exigences des nœuds enfants. Les messages WASP- scheme sont différentes pour le Sink et les nœuds enfants, mais ils sont généralement constitués des éléments suivants: (1) l'adresse du nœud émetteur (2) slots attribués aux enfants du nœud parent où ils envoient leur WASP- scheme (3) la durée silencieuse de la période (4) le transfert des données reçues au Sink (5) slot de contention (6) acquittement.

### III.3.2. Controlling Access with Distributed slot Assignment (CICADA)

CICADA [75, 76] est un protocole de routage à faible consommation d'énergie spécialement conçu pour les WBANs basé sur l'ordonnancement de TDMA multi-hop. CICADA améliore la fiabilité par la définition d'une distribution log normale pour la probabilité de lien au lieu d'une région de couverture circulaire. Il est une amélioration du protocole WASP qu'il prise en charge la communication bidirectionnelle.

Dans CICADA, chaque nœud calcule deux paramètres pour envoyer les données à son nœud parent. L'un est le nombre de slots nécessaires pour envoyer les données, et l'autre est le nombre de slots où le nœud doit attendre jusqu'à ce qu'il ait reçu toutes les données de son enfant. Sur la base de ces paramètres, tous les nœuds connaissent quand envoyer ses données.

### III.3.3. BIOCMM

BIOCMM [78] est un protocole de routage inter couche conçue sur la base de l'interaction entre la couche MAC et la couche réseau dans des réseaux de capteurs biomédicaux pour optimiser la performance globale du réseau. Cette interaction est obtenue grâce à une Cross-layer Messaging Interface (CMI) par laquelle la couche MAC envoie ses informations d'état à la couche réseau et vice-versa.

Plus précisément, la couche de réseau conserve une trace de l'espace vide dans sa tampons BS (Buffer Space) et cette information est envoyée à la couche MAC par l'intermédiaire du CMI par laquelle la couche MAC est capable d'attribuer une priorité plus élevée de transmission de

trame à des nœuds encombrés pour éliminer les pertes de paquets au niveau de couche de réseau en raison d'un dépassement de tampon. A la fois les deux couches MAC et réseau conservent chacun un tableau d'état de ses voisins Neighbor Status Table (NST) qui est réglé sur bloqué (B) ou Free (F) via le sous couche logique MAC (LLC). Chaque modification dans le message B et F est généré et envoyé par l'intermédiaire CMI à la couche réseau à travers lequel la couche réseau met à jour son NST.

### **III.3.4. Protocoles basés sur la QoS**

#### **III.3.5. LOCALMOR**

Un protocole de routage à base de QoS a été proposé dans [84] pour des applications biomédicales dans les WBANs nommé LOCALMOR. Il classifie le trafic de données en plusieurs catégories en fonction de la métrique de qualité de service requises de la question multi objectif, que ce soit à fiabilité, latence, débit et l'énergie résiduelle dans les nœuds de capteurs. Où des différentes techniques et des paramètres de routage sont fournies pour chaque catégorie. En outre, le protocole proposé peut être utilisé avec n'importe quel protocole MAC, car un mécanisme d'accusé de réception est utilisé.

#### **III.3.6. Data-centric Multi-objectiveQoS-awarerouting (DMQoS)**

Razzaque et. al [85] ont proposé DMQoS un protocole de routage multi - objectifs centré sur les données pour fournir une QoS en terme de fiabilité et de délai de transmission. Le protocole proposé fournit une qualité des services sur mesure pour chaque catégorie de trafic en fonction de leurs types de données générées. Il utilise une architecture modulaire, qui se compose de différentes unités.

#### **III.3.7. Framework de QoS**

Liang et. al [86] ont proposé un protocole de routage basé QoS pour les réseaux de capteurs biomédicaux dans le but de fournir différents supports de QoS et un service de routage par priorité dans le réseau. Ce protocole est réalisé via l'exécution des tâches suivantes :

- Mise en place et l'entretien des routes basées sur la QoS
- Organisation de priorité de routage des paquets
- Feedback sur l'état du réseau à l'application de l'utilisateur
- Equilibrage de trafic réseau
- Interfaces de Programmation d'Application (API).

### III.3.8. A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality (REL)

REL est un protocole de routage basé sur l'énergie et la qualité de la liaison pour les applications WSN / WBAN / IoT, telles que les maisons et les bureaux confortables, les soins de santé, les contrôles environnementaux et les villes intelligentes. REL utilise la qualité de lien des liaisons sans fil et de l'énergie restante pendant le processus de sélection de la route afin d'accroître la fiabilité du système et d'assurer La QoS de support pour les applications IoT. En outre, il comprend un mécanisme événementiel pour assurer l'équilibrage de charge et éviter la congestion et la mort prématuré des nœuds / réseaux. [109]

Le concept de base ainsi que l'architecture de fonctionnement de ce dernier vont être présentés dans le chapitre 3.

### III.4. Protocoles basés sur la température

Les signaux radio générés via les communications sans fil génèrent des champs électriques et magnétiques. L'exposition de ces champs électromagnétiques conduit à une absorption de rayonnement, ce qui se traduit par l'augmentation de température dans le corps humain [87]. Ainsi, le flux sanguin sera réduit et les organes sensibles peuvent faire face à des dommages thermiques sévères. La quantité d'énergie de rayonnement absorbée par le tissu corporel est définie comme le taux d'absorption spécifique SAR (Specific Absorption Rate) représenté en (5) [87].

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (W/Kg) \quad (5)$$

Où E est le champ électrique induit par rayonnement,  $\sigma$  est la conductivité électrique du tissu, et  $\rho$  est la densité du tissu. L'exposition à la SAR de 8 W / kg pendant 15 minutes a montré d'endommager le tissu [87]. En fait, SAR spécifie exactement la limite supérieure de la puissance d'émission autorisée. Ainsi, les protocoles de routage WBAN doivent diminuer activement l'émission de rayonnement et de la température. Par conséquent, même les routes à faible trafic et court Delay pourraient ne pas être efficaces en termes de température, ce qui rend le routage et la diffusion intolérable pour les nœuds.

L'objectif commun de tous les protocoles de routage basé sur la température examinés dans cette section est de maintenir la basse température entre les nœuds capteurs en évitant le routage sur les nœuds chauds.

### III.5. Thermal-aware Routing algorithm (TARA)

TARA [88] a été considéré pour les capteurs implantés dans le corps et considère l'emplacement des capteurs et l'histoire de routage groupée pour réduire au minimum les effets de l'élévation de la température sur le tissu humain. Il mesure les changements de température de ses nœuds voisins par le contrôle de nombres de paquets, le calcul du rayonnement de la communication et de la consommation d'énergie au niveau de ses voisins. TARA vise à réduire les risques de surchauffe et gère la transmission de paquets par définir des hot spots (des nœuds chauds) comme des zones qui dépassent une certaine température due à la communication de données. En conséquence, il vise à spécifier les routes de détournements autour de ces hot spots.

### III.6. Least Temperature Routing (LTR)

Bag et. al [89] ont proposé LTR qui est un protocole de routage basé sur la température pour WBAN. LTR définit des hot spots comme des zones qui ont une température élevée due à ses communications de données mises au point. Chaque nœud de LTR est supposé avoir connaissance de la température de ses nœuds voisins.

#### III.6.1. Hotspot Preventing Routing (HPR)

HPR [90] est un protocole de routage pour des applications biomédicales sensibles au Delay telles que la surveillance médicale. Il vise à éviter la formation des hot spots et de diminuer le Delay moyen de paquet. HPR achemine les paquets à travers les meilleurs nœuds à partir du nœud expéditeur à la destination avec un minimum des sauts, sauf si les hot spots existent dans cette voie. Cependant, le paquet est rejeté si le nombre de sauts est supérieur à MAX\_SAUT. Les paquets maintiennent également une liste des nœuds les plus récemment visités pour éviter les boucles. Le changement de température de nœuds voisins est calculé à travers le nombre de transmissions de voisins et l'estimation du nombre de paquets transmis dans un certain intervalle de temps.

#### III.6.2. Routing algorithm for networks of homogenous and Id-less biomedical sensor nodes (RAIN)

Les auteurs de [91] ont proposé RAIN comme un protocole de routage à tolérance aux pannes et fonctionne efficacement, même si certains de ses nœuds échouent suite d'un épuisement de leur énergie. RAIN fonctionne en trois phases : la phase de configuration, la phase de routage et la phase de mise à jour de statut. Dans la phase de configuration, chaque nœud utilise un générateur de nombres aléatoires pour générer un nombre aléatoire qui est assigné comme id-node dans la durée de vie opérationnelle du nœud. Tous les nœuds distribuent leurs ids à travers le réseau par leurs messages Hello. Id = 0 est donnée au nœud Sink.

### III.6.3. Thermal-Aware Shortest Hop Routing (TSHR)

TSHR [92] a été proposé pour les applications nécessitant une haute priorité pour délivrer un paquet à la destination et retransmit le paquet quand il a détruit. Deux phases de TSHR sont les suivantes :

- Phase de configuration où chaque nœud construire sa table de routage.
- Phase de routage où les nœuds tentent d'utiliser le plus court chemin vers la destination.

Clustering	Cross-Layer	Probabilistes	QoS	Température
<ul style="list-style-type: none"> <li>• HIT</li> <li>• <b>LEACH</b></li> <li>• Any-Body</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WASP</li> <li>• CICADA</li> <li>• BIOCMM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PRPLC</li> <li>• OBSFR</li> <li>• DVR-PLC</li> <li>• ETPA</li> <li>• PSR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Framework de QoS</li> <li>• DMQoS</li> <li>• LOCALMOR</li> <li>• <b>REL</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TARA</li> <li>• LTR</li> <li>• HPR</li> <li>• RAIN</li> <li>• TSHR</li> </ul>

*Figure 16 : Les Protocole de routage dans WBANs*

## IV. Conclusion

Nous avons essayé à travers ce chapitre de mettre le point sur les principaux défis de routage pour les systèmes WBAN. Puis nous avons présenté la Classification des protocoles de routage dans les WBANs, Cela nous a mené à faire une étude comparative entre deux principaux protocoles de routage (LEACH de la classe Clustiring et REL de la classe QoS) proposés dans le chapitre qui suit.

# **CHAPITRE III**

## **Simulation des protocoles de routage adoptés**

## **I. Introduction**

Dans ce chapitre on va se concentrer sur les sélectionnés pour notre étude comparative qui appartenant à deux classes différentes à savoir le protocole LEACH de la classe clustering et le protocole REL de la classe QoS, nous expliquerons l'architecture et l'algorithme détaillé de chacun des deux protocoles et nous citons en générale les avantages et inconvénients de ces protocoles.

La simulation des réseaux de capteurs consiste principalement en la reproduction du comportement et du fonctionnement des nœuds capteurs dans un environnement informatique ; pour des raisons tel que La répétition d'expérience, L'adressage des systèmes complexes, Le gain de temps et la variation des paramètres de simulation alors que la simulation réelle s'avère coûteuse, voire impossible dans quelque cas.

Dans ce qui suit, nous parlerons brièvement des simulateurs de réseaux existants, du simulateur choisi pour nos simulations "OMNET++" et de la plateforme des simulations de réseaux de capteur sans fil "CASTALIA".

## II. Les protocoles de routage choisi pour l'étude

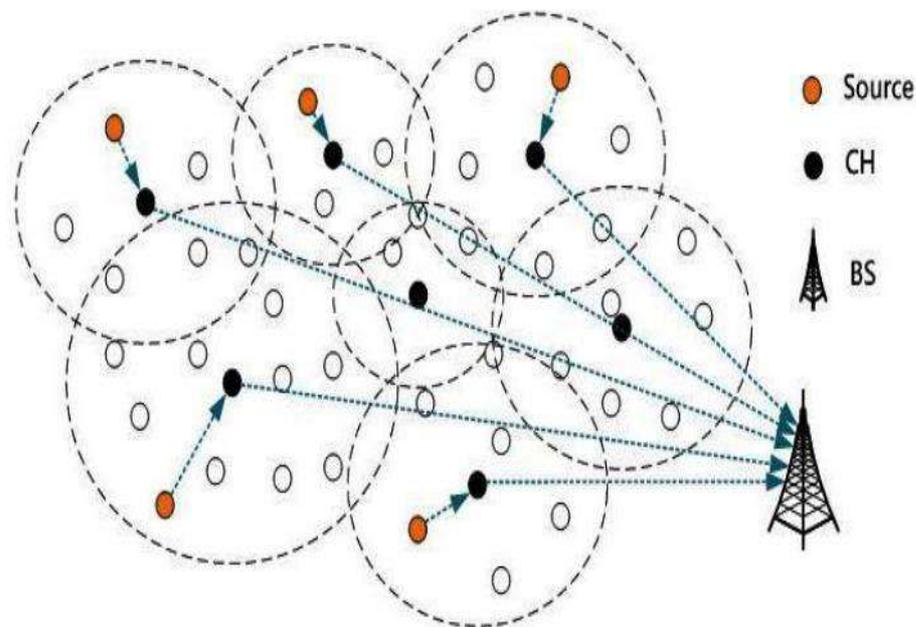
### II.1. Le protocole de routage hiérarchique LEACH

#### II.1.1. Architecture du LEACH

LEACH ((Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) proposé par Heinzelman et al. est un protocole de routage hiérarchique bien connu appliqué dans les RCSF.

LEACH divise le réseau en zones et clusters de façon distribuée, des nœuds CH (Cluster-Head) sont sélectionnés pour être utilisés comme relais pour atteindre le SINK en optimisant la consommation d'énergie suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe (CH) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds du réseau. Un nœud décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus.

A la formation des groupes comme indique la **figure 16**, tous les nœuds non-CH transmettent leurs données au CH. Quand le CH reçoit les données de tous les membres du cluster, il effectue des fonctions de traitement sur les données (agrégation et compression des données), et les transmet à la station de base (BS) selon une communication unicast (à un seul saut).



*Figure 17 : Architecture du routage hiérarchique LEACH.*

### II.1.2. Algorithme détaillé de LEACH

L'algorithme se déroule en rounds (tours) qui ont approximativement le même intervalle de temps déterminé au préalable. Où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission.

#### A) Phase d'initialisation

La phase d'initialisation se fait en 3 étapes : annonce, organisation des groupes et enfin ordonnancement.

- **Première étape : l'annonce**

Initialement, lorsque les groupes sont créés, chaque nœud décide ou non de devenir un CH pour le tour courant. Cette décision est basée sur pourcentage de CHs pour le réseau et le nombre de fois que le nœud a été un CH jusqu'ici. Cette décision est faite par le nœud en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre est inférieur à un seuil  $T(n)$  le nœud devient un CH pour le cycle actuel. Le seuil est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

- P est le pourcentage souhaité de CH c'est-à-dire choisi comme  $p = 0,05$  pour une condition optimale.
- r est le tour courant.
- G est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CHs lors des  $(1/p)$  tours précédents.

Chaque nœud est donné une probabilité égale de  $(1/p)$  de devenir CH afin de partager la charge de l'énergie. Ainsi, lors du commencement d'un tour, chaque nœud a une probabilité égale de devenir un CH.

Les nœuds qui étaient CHs doivent attendre jusqu'à  $(1/p)$  tours, donc augmenter la probabilité pour les non CH de devenir CH. Les nœuds sont de nouveau admissibles à devenir CHs si et seulement si tous les nœuds ont obtenu une fois la qualité de CH.

Tout nœud après  $((1/p)-1)$  tours sera de nouveau élu CH en supposant que chaque nœud possède et dissipe une quantité égale d'énergie à des fins de transmission. Chaque nœud qui se sera désigné CH pour le tour courant diffuse un message (d'initialisation) vers le reste des nœuds l'entourant. Lors de cette phase d'initialisation, les CHs utilisent le protocole MAC (Media Access Control) CSMA (Carrier Sense Multiple Access). En utilisant le même niveau d'énergie, tous les CHs diffusent leur message d'initialisation qui contient l'ID du nœud et un entête distinguable. Les autres nœuds doivent maintenir leurs récepteurs à l'écoute afin d'entendre les messages diffusés

par les CHs, et chacun de ces nœuds décide quel groupe rejoindre pour le tour courant en se basant sur la puissance des messages reçus de la part des CHs. Plus un nœud est proche du CH, plus le signal reçu sera puissant, indiquant à celui-ci qu'il aura besoin de moins d'énergie pour transmettre ses données vers le CH. Si deux signaux reçus ont la même puissance, alors le CH à rejoindre est choisi aléatoirement.

- **Deuxième étape : Organisation des groupes**

Après que chaque nœud ait choisi quel groupe rejoindre, le CH doit être informé des nœuds composant son groupe. Chaque nœud non-CH transmet une requête de rattachement vers le CH choisi en utilisant également un protocole CSMA MAC. Ce message ou requête de rattachement se compose de l'ID du nœud, de l'ID du CH et d'un entête. Durant cette phase, tous les CHs doivent maintenir leurs récepteurs allumés.

- **Troisième étape : Ordonnement**

Après avoir reçu les requêtes de tous les nœuds l'ayant rejoint, le CH leur alloue chacun un tour dans un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) en se basant sur le nombre de nœuds. Et ce n'est que pendant le temps qui leur est alloué que les nœuds peuvent transmettre leurs données vers le CH.

## **B) Phase de transmission**

Une fois que les groupes se sont organisés et le programme TDMA mis en place, la transmission de données commence avec l'hypothèse que les nœuds ont toujours des données à transmettre, mais ces données ne sont envoyées à la station de base que pendant l'intervalle de temps alloué au nœud.

Ce type de transmission requiert une énergie minimale pour la transmission. Les autres nœuds membres du groupe, dont ce n'est pas le tour, doivent éteindre leurs transmetteurs afin d'éviter la dissipation inutile d'énergie. Mais le CH doit garder son récepteur allumé durant le tour courant pour recevoir toutes les données envoyées par les nœuds membres, après quoi il exécute les fonctions de traitement du signal afin de former un signal unique à transmettre. Cette agrégation de données est alors envoyée à destination de la station de base. Le coût en énergie pour le CH est toujours supérieur à celui des membres à cause des différentes actions qu'il doit entreprendre et à cause de l'énergie nécessaire pour transmettre vers la station de base qui se trouve plus loin que la distance qui le sépare des nœuds membres. Cela donne la phase d'état stable. Après que la transmission des données soit terminée, le prochain tour de sélection des CHs commence pour ce cycle là comme expliqué dans la phase d'initialisation.

### II.1.3. Interférences entre groupes

Dans ce qui précède, nous avons montré comment les nœuds communiquent avec leurs CH et les CHs avec la station de base. Ces communications ayant lieu par signaux radio, les transmissions des nœuds d'un groupe donné peuvent interférer avec celles d'un groupe voisin. Ainsi, afin de réduire ces interférences, lorsqu'un nœud devient CH, il choisit parmi une liste éparse de codes CDMA (Code Division Multiple Access), celui qu'il désire utiliser et il informe tous les autres nœuds de son groupe de son choix. Ils utiliseront alors ce code-là lors de leurs futures transmissions et le CH Filtrera les signaux reçus en utilisant ce même code afin de reconnaître ceux émis par les membres de son groupe.

L'assignement électif des canaux de communication est une tâche difficile même en la présence d'une supervision centralisée. Et l'utilisation des codes CDMA n'est peut-être pas une solution optimale à l'égard de la bande passante mais elle produit une solution pour le problème de l'accès multiple d'une manière distribuée.

## II.2. A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality (REL)

REL est un protocole de routage basé sur l'énergie et la qualité de la liaison pour les applications WSN/WBAN, telles que les maisons et des bureaux confortables, les soins de santé, les contrôles environnementaux et les villes intelligentes. REL utilise la qualité de lien des liaisons sans fil et de l'énergie restant pendant le processus de sélection de route afin d'améliore la fiabilité du système et d'assurer la QoS du support. En outre, il comprend un mécanisme événementiel pour assurer l'équilibrage de charge et éviter la congestion et la mort prématuré des nœuds / réseaux.

### II.2.1. Estimation de la qualité du lien

Les liens dans les communications WBAN sont généralement peu fiables, car ils connaissent souvent des variations de qualité et une faible connectivité. Le manque de fiabilité du lien est causé par l'utilisation de radios à faible puissance, qui se sont révélées très sensibles au bruit et à l'interférence [111]. Dans ce contexte, la stratégie efficace pour sélection d'itinéraire d'un protocole de routage dépend de la précision du LQE (Link Quality Estimator) pour augmenter la fiabilité du protocole [112]. Comme mentionné précédemment, la qualité du lien est généralement mesurée comme une seule valeur telle que RSSI ou LQI.

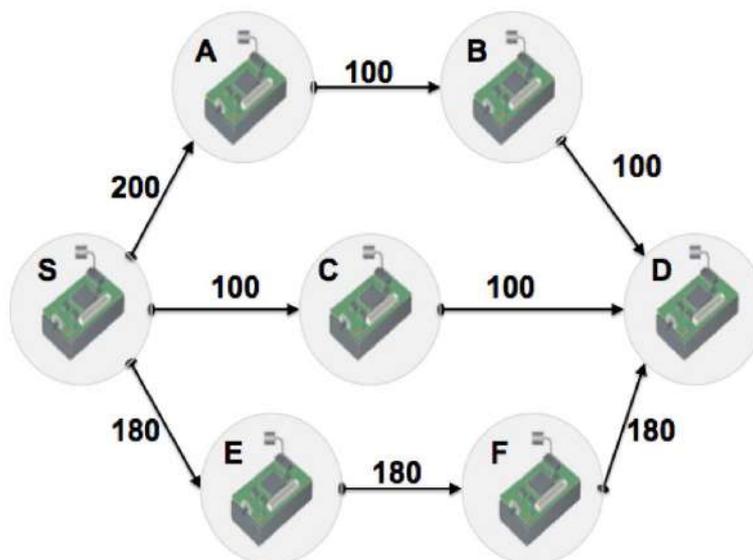
La procédure de découverte le chemin doit compter sur le LQE au moyen de (cross-layer informations). Dans ce scénario, les nœuds doivent pouvoir reconnaître les conditions du réseau, estimer la qualité de la liaison de bout en bout et avoir une connaissance de l'énergie restante de leur nœud voisin. Ils estiment également le nombre de sauts obligatoires pour chaque chemin possible, avant qu'ils ne puissent atteindre le nœud de destination. À la suite de cette approche, les nœuds doivent planifier et adapter dynamiquement la procédure de sélection de la route et prendre les décisions pour assurer la QoS et l'efficacité énergétique pour les applications réseau.

Lors de l'analyse d'un seul lien, REL Cela dépend sur LQI, qui est une métrique fournie par la couche physique de la norme IEEE 802.15.4. LQI varie de 0 à 255 et il est calculé sur la base de deux combinaisons paramètres (RSSI, SNR (Signal-Noise-Ratio))

Cependant, LQI fournit une valeur pour la qualité de liaison des nœuds voisins. Ainsi, pour améliorer la fiabilité du processus de découverte d'itinéraire, nous avons besoin de nouvelles techniques pour évaluer et collecter des informations sur la qualité du lien de bout en bout.

➤ **EXEMPLE D'Estimation de la qualité des liens:**

La **Figure18** montre l'importance de la sélection de chemin en fonction de la cross-layer information et du rôle de WeakLinks (Liens faibles) dans l'estimation de la qualité de liaison de bout en bout. Dans la **Figure18**, les nombres représentent les valeurs LQI, Les nœuds S et D sont respectivement les nœuds source et de destination.



*Figure 18 : Estimation de la qualité des liens (bout en bout)*

- REL utilisé le WeakLinks qui est un compteur pour les pires liens sur un chemin.
- Si le LQI pour un lien donné est inférieur à LQI<sub>th</sub> (seuil LQI), le lien est considéré comme faible et le compteur WeakLinks est incrémenté. Le WeakLinks est incorporé dans les messages RREQ et RREP, puis une mise à jour à chaque saut pendant l'algorithme de sélection de la route.
- Lors de la réception d'un message RREQ ou RREP, un nœud met à jour sa valeur LQI.
- Après cela, il faut calculer si LQI est inférieur à LQI<sub>th</sub> et mettre à jour les WeakLinks si nécessaire.

➤ **Selon la Figure 18**

Supposons LQI<sub>th</sub> = 170.

1. L'algorithme de sélection de la route qui choisit le chemin avec le plus moins nombre de sauts, sélectionnera donc le nœud **C** comme prochain saut.

**Cependant**, le nœud **C** a une qualité de liaison inférieure, ce qui mènera aux pertes de paquets.

2. L'algorithme sélection de la route qui n'utilise que la qualité de la liaison pour le prochain saut, sélectionnera le nœud **A** comme le prochain saut.

**Cependant**, il existe de mauvais liens sur les chemins restant, ce qui peut également provoquer des pertes de paquets et une utilisation inégale des ressources réseau.

**Enfin**, lorsque la métrique WeakLinks est analysée, on peut voir que :

Le nœud **A** a WeakLinks = 2, le nœud **C** a WeakLinks = 2 et le nœud **E** a WeakLinks = 0.

**Ainsi**, lorsque les liens sont analysés et sélectionnés dans la théorie de La qualité de la liaison de (bout en bout), le chemin le plus fiable est le nœud **E**. Cette route permet de fournir une plus grande fiabilité pour la livraison des données.

### II.2.2. Selection de chemin et équilibrage de charge

Les limitations du matériel de nœud et la variation de qualité des liens sans fil sont un grand défi pour fournir une disponibilité de service élevée [113], en particulier dans les applications WBAN, où il est nécessaire de créer des mécanismes permettant d'identifier ou d'atténuer ou de résoudre le problème de la consommation d'énergie. La consommation d'énergie peut être causée par la congestion ou L'exploitation excessive d'une route conduisant à la mort prématurée de nœuds. Comme nous l'avons déjà mentionné, la solution de routage doit être utilisée des mécanismes d'équilibrage de charge capables de détourner le trafic et, par conséquent, augmenter la QoS (moins de perte de paquets et de retard) et réduire la consommation d'énergie.

L'approche principale pour l'équilibrage est l'utilisation de plusieurs chemins [114] pour contrôler /acheminer le trafic sur différentes routes. Grâce à l'utilisation de plusieurs chemins, les nœuds peuvent augmenter la fiabilité pour la transmission et le débit de données au moyen d'une agrégation de bande passante et d'une consommation d'énergie équilibrée.

REL exploite un schéma réactif pour trouver des routes demandées, dans le but de réduire les coûts de signalisation et d'améliorer l'évolutivité. La procédure de sélection de la route implique la diffusion de messages RREQ et RREP. Ces messages recherchent les chemins disponibles et assistent La procédure de sélection de la route en recueillant des informations sur l'énergie restant et la qualité des liens. Chaque RREP reçu représente une route disponible vers nœud de destination et, selon la configuration REL, il est possible de stocker n routes possibles vers un nœud de destination donné.

REL intègre / gère les valeurs de trois paramètres clés pour trouver les meilleures chemins disponibles comme suit:

- 1) La qualité des liens sans fil basés sur la métrique de WeakLinks.
- 2) L'énergie restant.
- 3) Le nombre de sauts pour éviter les longs et inefficaces chemins.

La procédure de sélection de route pour REL ça dépend sur deux seuils pour comparer les chemins possibles.

- 1) Le premier est le seuil de comptage de saut ***HCdiffmax allow*** (Hop Count Maximum Difference), qui détermine quelle est la différence maximale de sauts sur un chemin donné.
- 2) Le deuxième seuil est ***Eth*** (Energy Threshold), qui est utilisé en deux étapes: la procédure de sélection de route et le mécanisme d'équilibrage de charge.

Dans le cas de l'optimisation de l'équilibrage de charge : l'***Eth*** correspond à la surveillance des niveaux d'énergie observés dans chaque nœud individuellement. Lorsque le réseau commence son exécution (phase bootstrap), chaque nœud doit stocker son propre pourcentage d'énergie restant et, après chaque unité time ***t***, le nœud doit comparer le niveau d'énergie actuel (***E(t)***) avec ce qui a déjà été enregistré (***E(t-1)***)

Si la différence entre ***E(t)*** et ***E(t-1)*** est supérieure à ***Eth***, elle indique un événement énergétique de décharge ou impliquant la nécessité d'une charge de la batterie.

La différence entre les niveaux d'énergie s'appelle ***IndRADV*** (Index RADV). L'***IndRADV*** doit être comparé à ***Eth***. Si la valeur dépasse le seuil, un message RADV (Route Advisor)(route conseiller) doit notifier les nœuds voisins. Le message RADV donne des informations sur la nouvelle valeur pour l'énergie restante et informe les nœuds voisins, où ils Devraient évaluer l'utilisation de ce nœud dans leurs routes.

L'**Algorithm 1** montre la procédure de sélection de la route, où il existe trois règles de base.

- **Règle 1 :** La fonction ***ShiftToRoute*** représente un basculement entre la route actif et la route alternative. Les trois règles filtrent les routes conformément aux conditions indiquées dans les lignes (5, 11 et 17). Ces conditions évaluent la route alternative (***Rb***) et le classer comme son niveau d'énergie, en le comparant à la route active actuelle (***Ra***).
- **Règle 2 :** La ligne(17) montre l'utilisation d'***Eth*** comme paramètre de tolérance (d'écart) pour la différence acceptable si ***Rb*** a moins d'énergie. Après avoir analysé le niveau d'énergie, l'algorithme calcule le nombre de sauts et évalue la qualité des liens. Cette évaluation se illustré dans les lignes (7, 12 et 18), où le seuil utilisé est ***HCdiffmax-allow***. Selon cet algorithme, la prochaine étape d'évaluation ne doit être analysée que si ***Ra*** est une route qui a plus de sauts (Lignes 6 et 12).
- **Règle 3 :** La règle décrite dans la ligne (17) est un cas particulier dans la procédure de sélection de la route puisqu'il analyse les cas où ***Rb*** a moins d'énergie que la route active. Dans ce cas, ***Rb*** doit remplacer ***Ra*** si  $(R_a.energy - R_b.energy \leq E_{th})$  et ***Rb*** est considérablement plus petite (Ligne 18)

**Algorithm 1:** Selection Route Algorithm of REL protocol.

```

1: Let  $HCdiff_{max\ allow} = \text{Hop Count Maximum}$ 
2: Let  $E_{th} = \text{Energy Threshold}$ 
3: Let  $R_a = \text{Active Route}$ 
4: Let  $R_b = \text{Alternative Route}$ 
5: if  $R_a.energy = R_b.energy$  then
6:   if  $R_a.hop\ Count > R_b.hop\ Count + HCdiff_{max\ allow}$  then
7:     if  $R_a.weakLinks \geq R_b.weakLinks$  then
8:       Shift To Route( $R_b$ )
9:     end if
10:   end if
11: else if  $R_a.energy < R_b.energy$  then
12:   if  $R_a.hop\ Count + HCdiff_{max\ allow} \geq R_b.hop\ Count$  then
13:     if  $R_a.weakLinks \geq R_b.weakLinks$  then
14:       Shift To Route( $R_b$ )
15:     end if
16:   end if
17: else if  $R_a.energy > R_b.energy$  and  $R_a.energy \leq R_b.energy + E_{th}$  then
18:   if  $R_a.weakLinks \geq R_b.weakLinks$  and  $R_a.hopCount > R_b.hopCount + HCdiff_{max\ allow}$  then
19:     Shift To Route( $R_b$ )
20:   end if
21: end if

```

Dans cet algorithme, l'utilisation du seuil d'énergie ( $E_{th}$ ) et le seuil de nombre de sauts ( $HCdiff_{max\ allow}$ ) sont représentés un excellent système de réglage, Capable de configurer de la manière dont le protocole fonctionne conformément au but et aux objectifs de notre réseau application. Par exemple, imaginez un scénario avec  $HCdiff_{max\ allow} = 7$ . Cela besoin aux opérations d'équilibrage de charge, car il existe un plus grand nombre de route possibles. cela provoque un retard dans le délai livraison de paquets puisque les routes (longs) avec plus de sauts utilisés.

### III. Les simulateurs de réseau sans fil

#### III.1. NS2 :

NS est un simulateur à évènements discrets très répandu dans le domaine de la recherche pour tout ce qui se réfère aux réseaux. L'utilisation de l'appellation "NS2" précise la version du simulateur NS.

Il constitue un support important pour la simulation de protocoles TCP, protocoles de routage, protocoles de multicast.

Le développement de NS suit une approche orientée objet qui utilise deux langages de programmation : C++ et TCL. Les modules de base du simulateur et les protocoles sont implémentés en C++ avec une couche TCL au-dessus, qui fournit une interface flexible et facile à utiliser [5].

La figure suivante illustre les différents composants internes du simulateur :

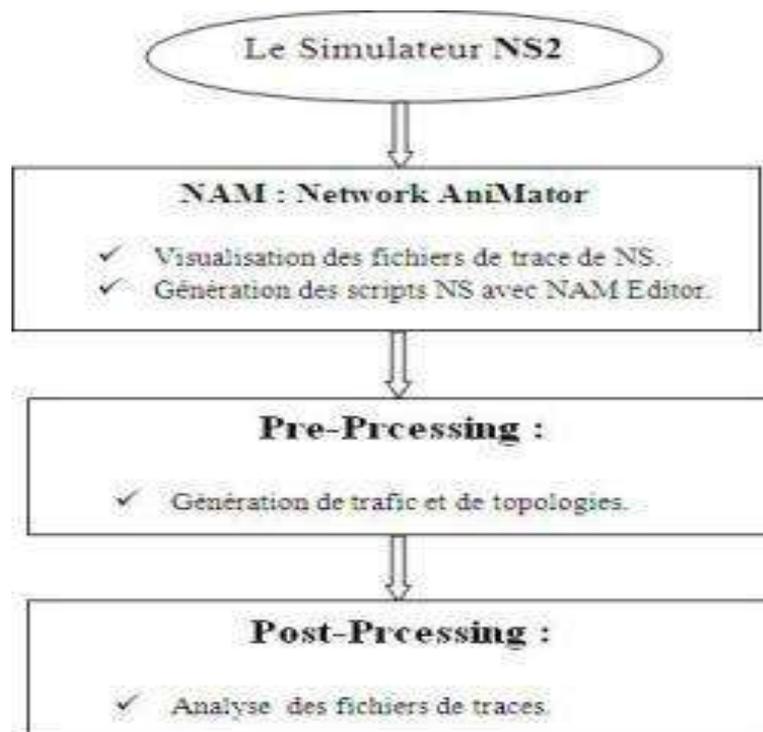


Figure. 19 - Description architecturale du simulateur NS2.

### III.2. GloMoSim

GloMoSim (Global Mobile information System Simulator) a été conçu selon une architecture orientée « couche » similaire que celle des sept couches OSI pour les réseaux [95].

Il a été développé au laboratoire UCLA Parallel Computing Laboratory en utilisant le langage PARSEC.

PARSEC (PARallel Simulation Environnement for Complex System) est un langage de programmation dérivé du langage MAISIE. Tous deux sont destinés à la simulation à événements discrets. Ils ont été développés à partir du langage C à l'université UCLA (University California Los Angeles).

Le transfert de paquets dans GloMoSim se fait selon le schéma suivant :

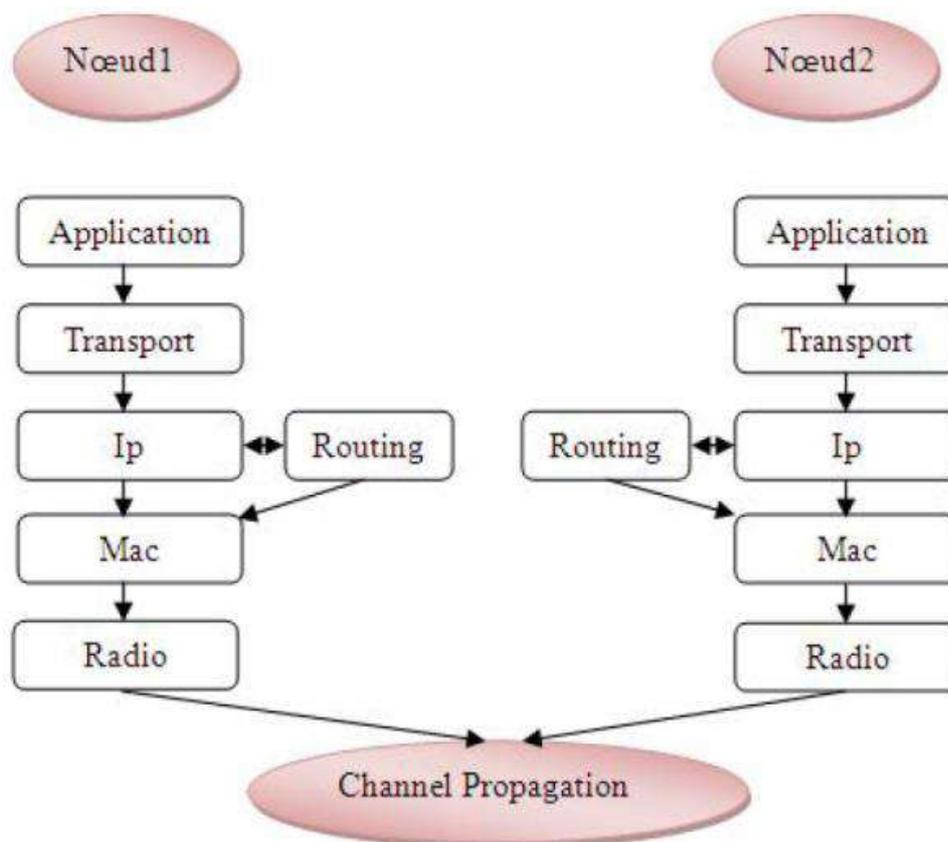


Figure. 20 : Transfert des paquets dans GloMoSim

### III.3. OMNET++

OMNeT++ IDE (Integrated Development Environment) est basé sur la plateforme Eclipse. C'est un environnement open source qui fournit des outils pour la création et la configuration des modèles de réseaux (les fichiers NED et INI) et des outils pour l'exécution d'un lot de programmes ainsi que pour l'analyse des résultats de simulation[96].

OMNeT++ semble être le meilleur parmi les solutions open source et freeware. OMNeT++ semble séduire de plus en plus la communauté scientifique et un nombre croissant de modèles sont disponibles. Dans ce qui suit, il aura une vue plus détaillée sur le simulateur ainsi les raisons du choix de ce simulateur.

## IV. Comparaison entre les simulateurs

La simulation est souvent moins chère que l'expérimentation et comporte beaucoup moins de risques lorsque l'homme fait partie du système étudié. Les résultats peuvent être obtenus beaucoup plus rapidement. La simulation (surtout numérique) est basée sur une connaissance des phénomènes qui ne peut être obtenue que par l'expérimentation.

Une simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant obtenues par des expérimentations sur des phénomènes antérieurs et analogues. Quelle que soit la qualité de la simulation, elle ne remplace pas totalement l'expérimentation. Voici un tableau général décrivant les avantages et inconvénients des simulateurs décrit auparavant:

Simulateurs	Avantages	Inconvénients
<b>NS2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilise l'Orienté Objet,</li> <li>• Permet la simulation des comportements des protocoles standards,</li> <li>• Nombreux protocoles disponibles,</li> <li>• Simulateur Multi-Couches.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conçu pour les réseaux filaires,</li> <li>• Difficulté d'ajout de nouveaux modèles à cause des dépendances entre modules,</li> <li>• Intégration difficile à d'autres applications,</li> <li>• La faible performance des simulations de réseaux importants, Scénario de simulation décrit en Otcl.</li> </ul>
<b>GloMoSim</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Initialement conçu pour les réseaux sans fil (Surtout les réseaux Ad Hoc),</li> <li>• Exécution des simulations relativement rapide,</li> <li>• Environnement de simulation parallélisable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité de maîtriser le Parsec pour toute personnalisation autour du noyau,</li> <li>• Installation assez complexe.</li> </ul>
<b>OMNET++</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Architecture modulaire permettant l'intégration de nouveaux modèles,</li> <li>• Utilisation du C++ (et récemment du C#) pour le développement du noyau,</li> <li>• Les classes de base du simulateur peuvent être étendues et personnalisées,</li> <li>• Conception de modèles se rapprochant de la réalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne prend pas en charge le cas des réseaux de capteurs.</li> <li>• Peu de modèles pour les réseaux sans fils,</li> <li>• Description des modèles en langage NED.</li> </ul>

*Tableau 06 : Les avantages et inconvénients des simulateurs*

## V. Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++)

### V.1. Choix du simulateur OMNET++

Le déploiement d'un réseau de capteurs exige une étape de simulation avant son installation sur site. La simulation permet de tester à moindre coût les performances d'une solution.

OMNeT++ est un environnement de simulation à événements discrets basé sur le langage C++, une application open source et sous licence GNU [98]. Il est totalement programmable, paramétrable et modulaire ainsi grâce à son architecture flexible et générique, il a été utilisé avec succès dans divers domaines, notamment [99]:

- La modélisation de réseaux de file d'attente,
- La modélisation de protocoles de communication,
- La validation des architectures hardware,
- L'évaluation de performances pour des systèmes software complexes.

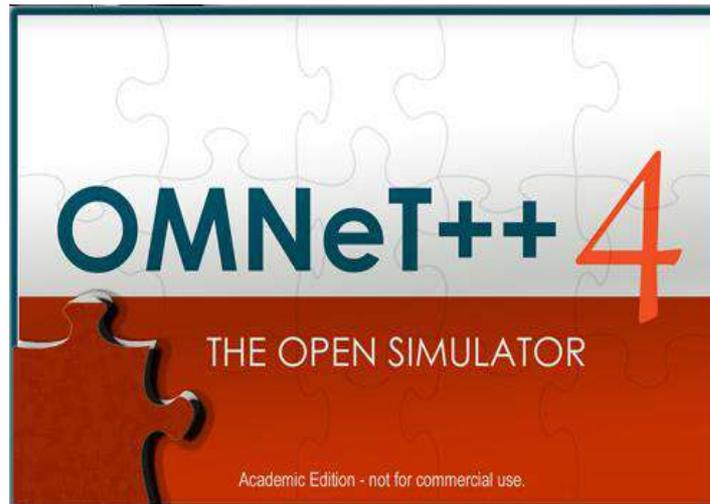
OMNET++ sera notre environnement de simulation, grâce à son architecture modulaire, il s'agira d'étendre le simulateur en implémentant un nouveau modèle spécifique aux réseaux de capteurs.

#### V.1.1. Présentation d'OMNET++

OMNET++ est un environnement de simulation à événements discrets. Utilisé pour la simulation des réseaux de communication, et d'autres systèmes distribués [100].

Grâce à son architecture modulaire, OMNET++ est très largement répandu dans divers domaines d'applications tel que :

- La modélisation des protocoles de communications.
- La modélisation des réseaux filaires et sans fils.
- La modélisation des systèmes répartis.
- Les architectures Hardware.
- En général, il peut être utilisé pour n'importe quel système à événements discrets pouvant être modélisé selon des entités communiquant par envoi de messages.

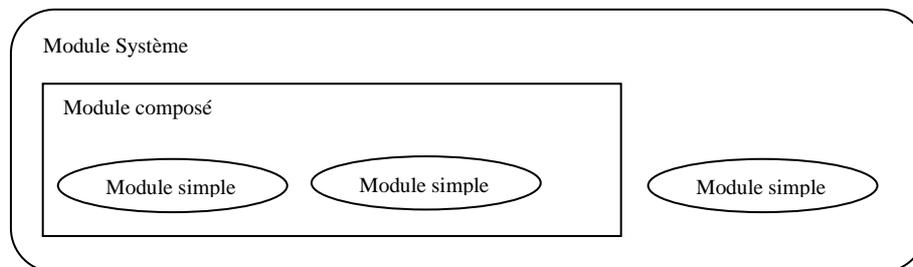


**Figure. 21 :** Le lancement du simulateur Omnet++.

OMNET++ est basé sur la plateforme Eclipse. Il fournit des outils pour la création et la configuration des modèles de réseaux (les fichiers NED et INI) et des outils pour l'exécution d'un lot de programmes ainsi que pour l'analyse des résultats de simulation.

### V.1.2. Description architecturale d'OMNET++

Les modèles OMNET++ constituent en un ensemble de modules hiérarchiquement emboîtés tel qu'il est montré dans la (**Figure 22**) :



**Figure. 22 :** Architecture Modulaire du simulateur Omnet++

Les modules Simples sont écrits en C++ en utilisant la librairie de simulation d'OMNET++, Ces derniers contiennent des algorithmes relatifs au modèle implémenté. Le groupement des modules simples constitue des modules composés sachant que leurs communications sont gérées grâce à des connexions entre les modules via des " gates (ports) ".

Au niveau plus élevé, le module système est créé par l'utilisateur. C'est un module spécial qui n'a pas de connexions avec l'environnement extérieur, mais plutôt avec ses composants internes (Modules simples et composés) [98].

Les modules peuvent s'attribuer des paramètres assignés aux modules dans les fichiers de description de réseaux (fichiers NED) ou encore dans le fichier de configuration « omnetpp.ini ». Ces paramètres sont utiles pour la personnalisation du comportement des modules simples ou encore pour le paramétrage de la topologie du modèle.

### V.1.3. Installation du simulateur OMNeT++

L'installation d'OMNET++ se fait en différentes étapes suivant une procédure d'installation décrite dans le package téléchargé selon le système d'exploitation installé [101]. Les éléments installés sur l'ordinateur seront les suivants :

- Une bibliothèque de simulation interne.
- Un compilateur du langage descriptif de la topologie NED (nedc).
- Un éditeur de réseaux graphiques pour les fichiers NED (GNED).
- Un exécutable Omnet++.
- Une Interface graphique de simulation IDE.
- Un outil de documentation de modèle (opp\_neddoc).
- Autres utilitaires (l'outil de création makefile, etc.).
- Une documentation, des simulations types, etc.

### V.1.4. Les principaux fichiers d'OMNET++

Les différents fichiers sont [99] :

#### V.1.4.1. Fichier (.Ned) :

Utilise le langage NED de description de réseau. Il peut être utilisé en 2 modes : Mode Graphique ou Mode Texte qui permettent de décrire les paramètres et les ports du module. Les erreurs comisent sont indiquées en temps réel par un point rouge situé à la gauche du code.

Un exemple de fichier Ned en mode "Source" & "Graphique" sont présentés dans *la (Figure23 et Figure 24)*.

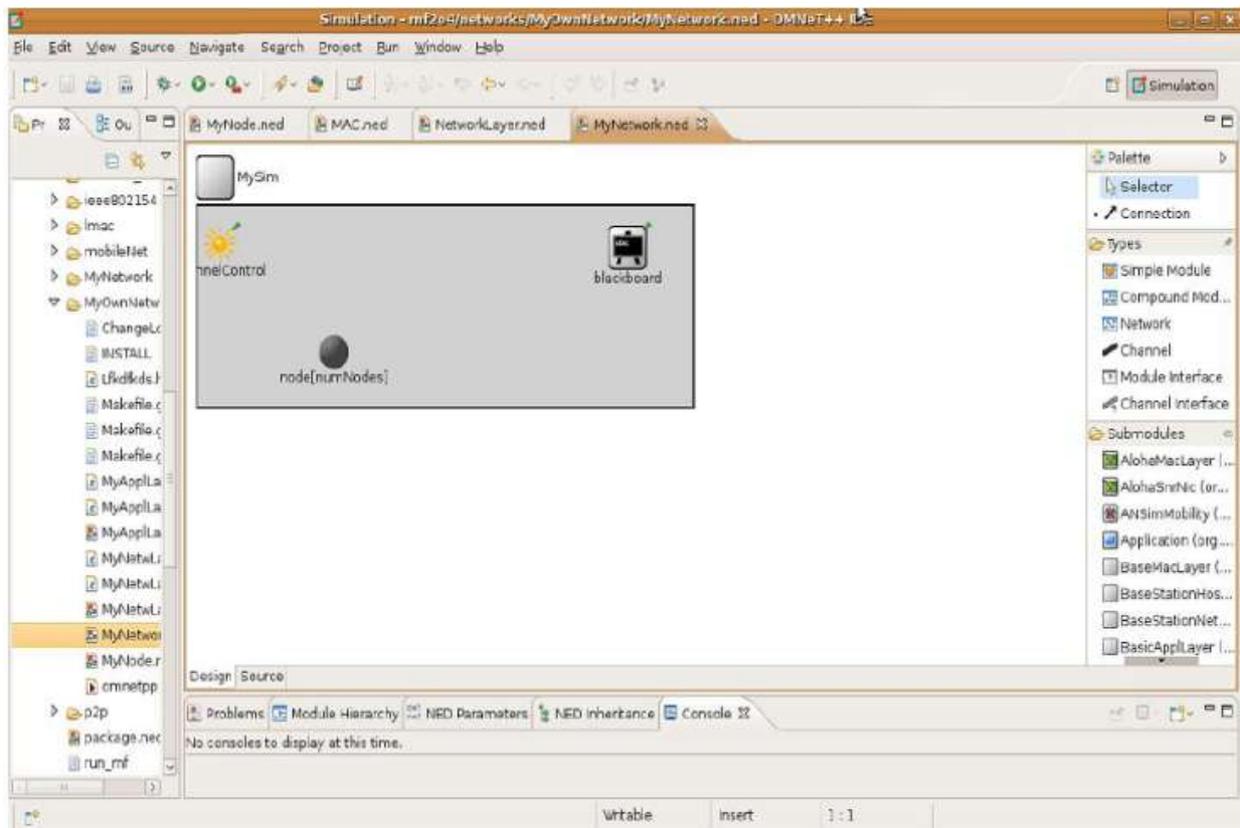


Figure 23 : Fichier NED en mode graphique.

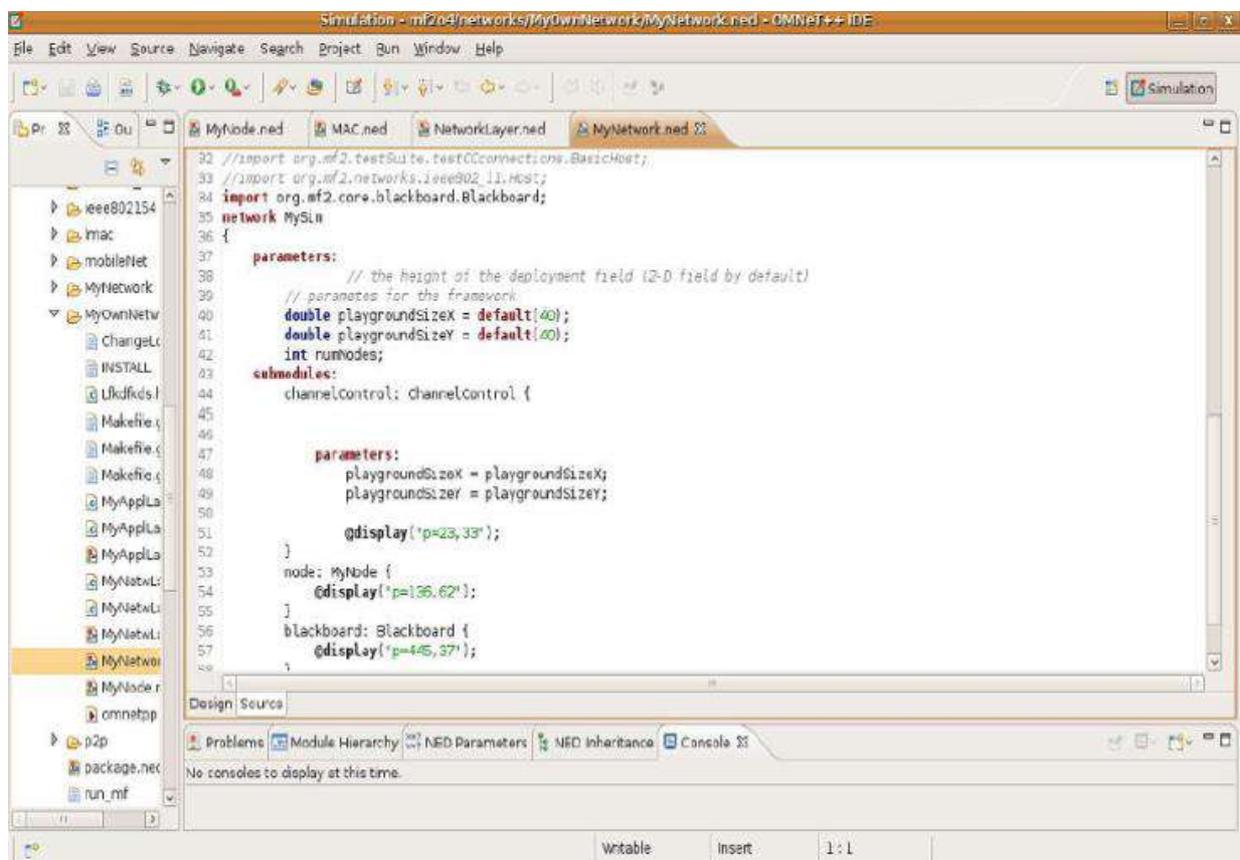


Figure 24 : Fichier NED en mode texte

### V.1.4.2. Fichier (.ini) :

Est lié étroitement avec le fichier NED. Permet à l'utilisateur d'initialisé les paramètres des différents modules ainsi la topologie du réseau.

Voici un exemple présenté ci-dessous :

```
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
include ../Parameters/MAC/CSMA.ini
sim-time-limit = 20s
SN.field_x = 70 #40
SN.field_y = 70 #10
SN.numNodes = 20
SN.deployment = "[1..99]->uniform"
SN.wirelessChannel.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.Radio.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.MAC.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.Routing.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Application.collectTraceInfo = false
SN.node[*].SensorManager.collectTraceInfo = false
SN.node[*].ResourceManager.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.RoutingProtocolName = "LeachRouting"
SN.node[*].Communication.Routing.netBufferSize = 1000
SN.node[0].Communication.Routing.isSink = true
SN.node[*].Communication.Routing.slotLength = 0.2
SN.node[*].Communication.Routing.roundLength = 20s
SN.node[*].Communication.Routing.percentage = 0.05
SN.node[*].Communication.Routing.powersConfig = xmldoc("powersConfig.xml")
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.packet_rate = 1
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
SN.wirelessChannel.onlyStaticNodes = true
SN.wirelessChannel.sigma = 0
SN.wirelessChannel.bidirectionalSigma = 0
SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 2.0 # Free Space
SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile =
"../Parameters/Radio/CC2420.txt"
```

*Figure 25 : Exemple d'un Fichier \*.Ini.*

### V.1.4.3. Fichier (.msg) :

Les modules communiquent en échangeant des messages. Ces derniers peuvent être déclarés dans un fichier dont l'extension est (.msg) où l'on peut ajouter des champs de données. OMNeT++ traduira les définitions de messages en classes C++.

Le diagramme suivant peut donner une idée plus détaillé sur le développement d'exécution d'une simulation sous Omnet.

## V.2. Les plates-formes d'OMNET++

Le simulateur OMNeT++ n'est pas spécialisé pour les réseaux de capteurs sans fils, Pour cela il existe plusieurs extensions, plate forme et simulateurs basés sur OMNET++ qui essaient d'introduire ce manque comme "Mixim", "Castalia" ...etc

### V.2.1. Mixim

Mixim [100] est un simulateur qui intègre et développe plusieurs cadres existants pour les simulations sans fil et mobiles dans OMNeT++. Bien que OMNeT++ n'a pas un soutien clair des modèles de simulation pour la communication sans fil, Mixim fournit des modèles détaillés de canal sans fil (décoloration, etc), la connectivité sans fil, la mobilité, les obstacles et les protocoles MAC comme IEEE 802.11b et IEEE 802.15.4. Mixim propose des modules pour une mise en œuvre facile de nouveaux protocoles MAC comme Time Division Multiple Access (TDMA) ou en fonction des protocoles hybrides (p. ex Z-MAC). Mixim est écrit avec le langage C++ comme Castalia et OMNeT++.

### V.2.2. Castalia

Castalia [100] [104] est également un simulateur de niveau pour les réseaux de capteurs basé sur OMNeT++. Il s'agit d'un simulateur générique avec un canal sans fil et un modèle de radio basé sur des données mesurées. Comme il est illustré à la (*Figure 26*), Castalia définit trois modules principaux : le nœud, Processus physiques et les canaux sans fil. Castalia est développé avec le C++.

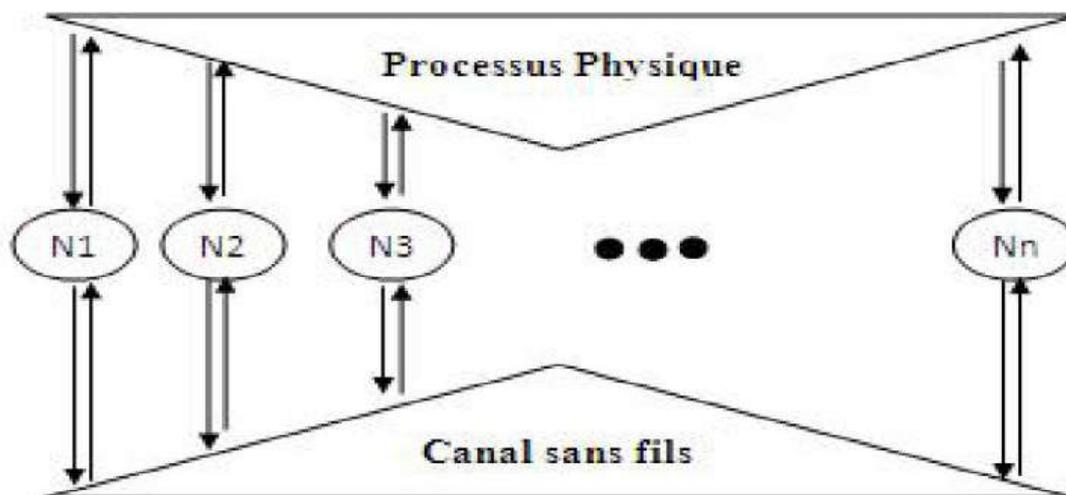
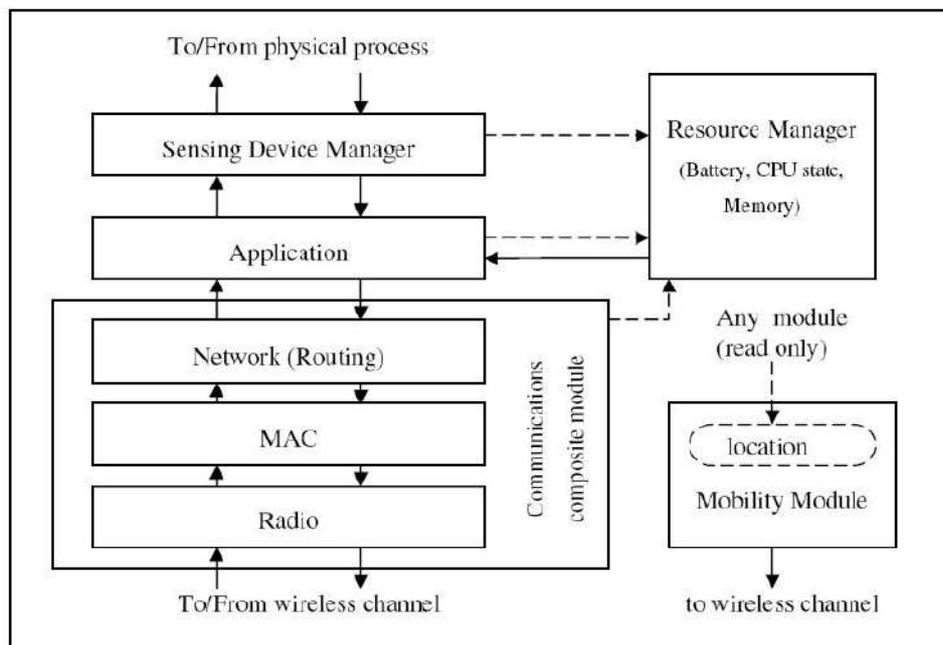


Figure 26: Les connexions des modules sous Castalia.

Le module nœud est en fait un composite. La (**Figure 27**) montre la structure interne du module nœud. Les flèches pleines signifient le passage de message et les flèches en pointillés signifient une interface entre les modules et les appels fonctions.

Par exemple, la plupart des modules font appeler au gestionnaire de ressources pour signaler la consommation d'énergie. Le Module d'application est le plus touché par l'utilisateur, le plus souvent par la création d'un nouveau module pour mettre en œuvre un nouvel algorithme. Les modules MAC, Routage, ainsi que le module de mobilité, sont également modifiés, généralement la création d'un nouveau module est en cause pour la création d'un nouveau protocole. Tous les modules existants sont très accordés par de nombreux paramètres.



**Figure 27:** Les principaux composants d'un nœud.

### V.3. Détails sur Castalia

Comme il est décrit précédemment Castalia est une plate forme sous OMNeT++ conçue particulièrement pour les RCSF [105].

La structure de Castalia [106] est également reflétée dans l'hierarchie avec un code source. Chaque module contient un dossier "ned" qui définit le module lui même. Si le module est composé, les sous- répertoires existant définissent les sous-modules avec un code de C++ (cc, dossiers de h) qui définit son comportement. Cette hiérarchie complète des dossiers "ned" définit la structure globale du simulateur de Castalia.

Les principaux modules de Castalia sont :

### V.3.1. Le module MAC

La couche MAC joue un rôle très important en infectant les différents états aux nœuds pour améliorer l'efficacité énergétique : nœud en état de transmission (Transmit), d'écoute (Idle), ou en sommeil (Sleep). Le module "Radio" modifie ces états en fonctions des cas particuliers. Les utilisateurs peuvent modifier les paramètres aux exemples illustrés au niveau de Castalia pour la couche MAC en utilisant le fichier de configuration OMNeT++ (.ini). Par un simple réglage de certains paramètres des fichiers MAC "CSMA/CA", "TMAC", et "l'AMCC" de différentes simulations seront gérés.

### V.3.2. Le module Radio

Il est conçu sur la base des réseaux de capteurs sans fil avec trois états : le sommeil, la transmission et l'écoute. En outre, la consommation d'énergie sera différente dans chaque Etat. C'est la caractéristique principale de ce module. La (*figure 28*) peut donner une idée générale sur le changement d'état.

### V.3.3. Canal sans fil

Le module du canal sans fil est conçu pour modéliser l'environnement sans fil, qui est une évolution dynamique de l'environnement pour le nœud statique et mobile. Il y-a quatre principaux modèles de canal sans fil qui sont conçus :

- 1) la modélisation moyenne de perte de trajet.
- 2) la modélisation des variations temporelles.
- 3) les interférences.
- 4) la modélisation simple.

Castalia utilise certaines formules pour estimer chacun des quatre modèles selon de nombreuses expériences réalistes.

### V.3.4. Le module Routage

La fonction la plus importante du module de réseau est de recevoir le message de MAC module, et envoyer un message à la demande. Il dépend des informations d'entête, Il existe deux types d'algorithmes de routage dans Castalia : simple Tree Routing et multi path Rings Routing.

Tous les modules de routage partagent 3 paramètres sont :

- 1) *maxNetFrameSize* : détermine la taille maximum de paquet.
- 2) *netDataFrameOverhead* : place les frais généraux supplémentaires aux paquets d'application.
- 3) *netBufferSize* : indique la taille de l'amortisseur trouvé dans le module.

### V.3.5. Le module Application

Le module Application est le module principal utilisé pour contrôler d'autres modules tels que le module de gestion des ressources, module de traitement physique, le module de routage, et le module radio. Ainsi ce module utilise également le mécanisme de message pour effectuer des actions différentes.

## VI Outils Simulation

L'installation du simulateur OMNET++ et la plate forme Castalia est comme suit :

### VI.1. Installation d'OMNET++ Version 4.6

Avant de commencer l'installation, il faut tout d'abord télécharger le code source omnetpp4 du site (<http://www.omnetpp.org/>) sans oublié de vérifié la version Linux, ensuite copier la source dans le dossier voulue et se positionner avec l'invite de commande dans ce dossier et suivre les étapes suivantes :

```
1. sudo tar xzf omnetpp-4.0b2-src.tgz -C /usr/local/ ;
2. cd /usr/local ;
3. sudo ln -s omnetpp-4.0b2 omnetpp ;
4. sudo apt-get install bison, flex, bit, lmodern, giftrans, doxygen, libxml2-dev, graphviz,
imagemagick ;
5. sudo apt-get install tcl8.4, tk8.4, tcl8.4-dev, tk8.4-dev ;
6. export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH :/usr/local/omnetpp/lib ;
7. export TCL_LIBRARY=/usr/share/tcltk/tcl8.4 ;
8. export PATH=$PATH :/usr/local/omnetpp/bin;
9. cd /usr/local/omnetpp ;
10. sudo ./configure;
11. sudo ./make ;
```

*Figure 28: Les étapes d'installation d'OMNeT en mode CMD.*

## VI.2. Installation de Castalia 3.2

Les étapes sont les suivantes [106] :

1. Décompression de l'archive Castalia déjà télécharger à partir du site (<http://castalia.npc.nicta.com.au/download.php>) avec la commande : `xzf castalia.tgz`
2. Importation du projet dans OMNeT++ ide : Après avoir lancé Omnet++, l'importation du projet se fait avec un clique droit sur "General->Exiting project into workspace" et en choisir la racine du projet.
3. Exécution d'un exemple : Une fois l'importation est en complet, un click droit sur le fichier *omnetpp.inide* n'importe quel exemple lance la simulation et généré un fichier \*.txt qui se définit comme le fichier trace de la simulation.

### ➤ Les Commandes Castalia

Faut se situé dans le répertoire voulu :

1. `../bin/Castalia` Affiche la liste des fichiers et des configurations.
2. `../bin/Castalia -c General` Commencer l'exécution de la configuration. Ce qui donne un fichier trace.
3. `CastaliaResults` Affiche les résultats obtenus lors de l'exécution.
4. `CastaliaPlot` Affiche le graphe des simulations.

## **VII. Conclusion**

Dans ce chapitre et Après avoir présenté le concept de base ainsi que l'architecture de fonctionnement de nos protocoles de routage (LEACH et REL), nous avons présentés les différents simulateurs existant pour les réseaux de capteur sans fil. Parmi ces simulateurs, nous avons focalisé notre choix a sur OMNET++ qui a l'avantage de sa structure modulaire et sa flexibilité.

Nous avons ensuite présenté la plate-forme Castalia qui est très adapté pour la simulation des WBAN et c'est pourquoi nous l'avons adopté pour la simulation des protocoles choisies.

Dans le chapitre qui suit, on va entamer l'étape d'implémentation qui constitue un point important dans le processus d'analyse des performances de nos Protocoles. On décrira nos étapes de programmation du protocole proposé dans le chapitre 4, le plus intégré au sein du simulateur OMNeT++ et Castalia au niveau des différentes couches ainsi on analysera les résultats de simulation d'un réseau WBAN.

# **CHAPITRE IV**

## **Implémentation et Simulation**

## I. Introduction

Afin d'évaluer les performances des deux protocoles sélectionnés pour l'étude comparative nous allons présenter dans ce chapitre dans un premier lieu les outils utilisés pour la réalisation de notre simulation, ensuite les différentes étapes de l'implémentation de deux protocoles à l'aide du simulateur ONET++ et en exploitant le Framework Castalia., enfin il y aura des présentations détaillées des résultats obtenues et la discussion de ces résultats.

## II. Environnement de Simulation

### II.1. Environnement matériel

La simulation a été réalisée sur un ordinateur ASUS dont la configuration est comme suit :

<b>Processeur</b>	Intel Core I5 CPU 2.3 GHz
<b>Mémoire</b>	8 GB
<b>Disque dur</b>	1 TO

*Tableau 7 : caractéristiques générales du PC utilisé pour la simulation*

### II.2. Environnement logiciel

Notre simulation a été réalisée dans l'environnement logiciel suivant :

- Système d'exploitation : WINDOWS 8.1.
- Le simulateur OMNet++ 4.6 ;
- Le Simulateur Castalia 3.2.

## III. Réalisation de la simulation

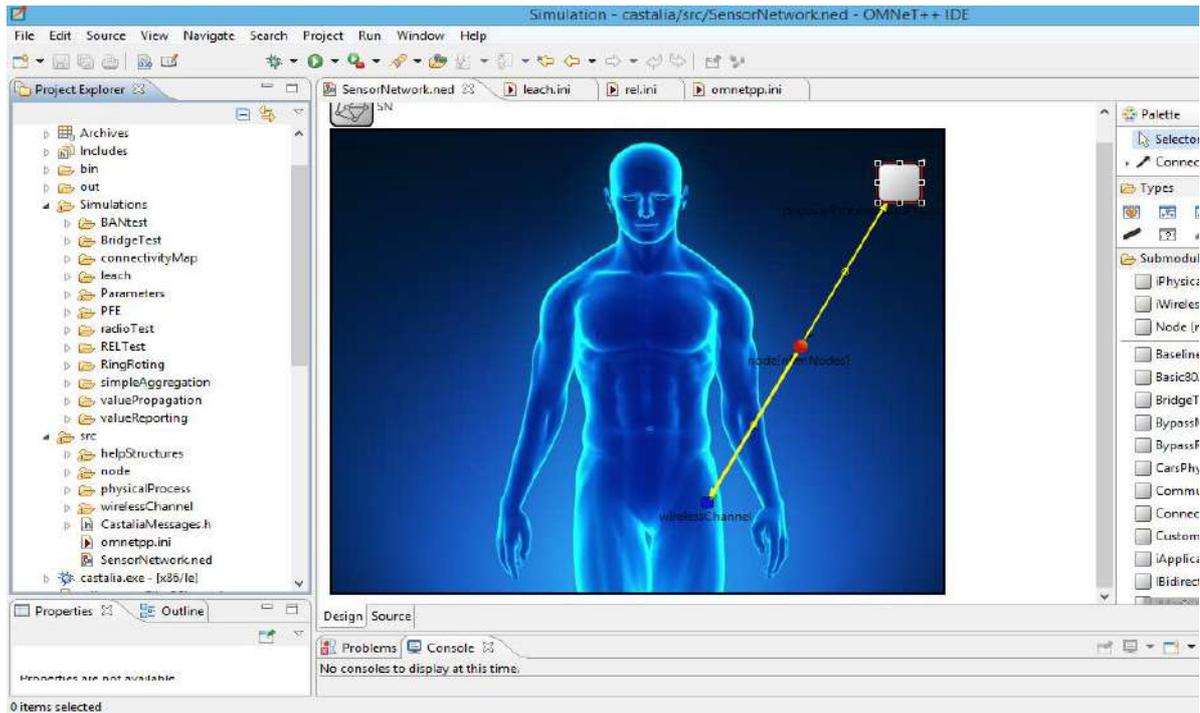
### III.1. Objectif

Notre objectif est d'adapter le code source des deux protocoles au simulateur OMNET++ et exploiter les fonctionnalités du Framwork « Castalia » pour obtenir des résultats présentatifs.

Les codes source des deux protocole (LEACH et REL) sont téléchargés gratuitement à partir d'internet, le premier est développé en 2011 par un groupe de recherche de l'Université fédérale du Para, Brésil, et le deuxième est développé en 2012 par un autre groupe de recherche de de la même université.

### III.2. Description du réseau des capteurs

Le Réseau de capteurs à implémenté est présenté dans le fichier (SensorNetwork.ned). Ce dernier possède de type de présentation : une présentation Graphique et une autre textuel (code Source)



**Figure 29 : présentation graphique du fichier SensorNetwork.ned**

Dans CASTALIA Un capteur sans fil est composé de trois unités (modules) : un module nœud, un module canal pour la communication entre les nœuds et un module processus physique (physicalProcess) pour la gestion des données capturées par les capteurs.

### III.3. Implémentation des protocoles de routages :

#### a) Etape d'importation d'un protocole de routage dans le projet CASTALIA.

- 1- Copiez le dossier qui contient les fichiers de base du code source de routage (\*.cc et \*.h) dans le répertoire "Castalia/src/node /communication/routing/".
- 2- Copiez le dossier qui contient le fichier d'initialisation des paramètres de simulation (\*.ini) dans le répertoire "Castalia/Simulations/".
- 3- Ouvrez l'éditeur de ligne de commande associé avec omnet++ (mingwenv.cmd) allez dans le répertoire de Castalia en suite tapez les commandes suivantes :
  - ./makemake
  - make

Ainsi le protocole en question est importé et pourra être exécuté soit en mode ligne de commande soit dans l'interface graphique d'OMNET.

#### b) Configuration du fichier d'initialisation des paramètres de simulation (omnet.ini) :

Afin d'obtenir des résultats de simulation présentés de façon significative, il est impératif de modéliser un fichier d'initialisation de la simulation qui permettra d'obtenir les

résultats des deux protocoles en même temps i.e. veut dire programmer un fichier (.ini ) qui contient le code source de l'initialisation d'un ensemble de paramètres commun pour les deux protocoles ainsi que l'exécution simultanée de leurs simulations. C'est ainsi que nous avons réalisé notre propre fichier de code source omnet.ini.

```

# *****#
#      Module:  LEACH/REL Protocol for Castalia Simulator      #
# *****#
[General]
include ../Parameters/Castalia.ini
include ../Parameters/MAC/CSMA.ini
sim-time-limit = 300s
SN.numNodes = ${NbNode = 16, 24, 32}
SN.field_x = 10                               #40
SN.field_y = 10                               #10
SN.deployment = "[0..99]->uniform"
SN.node[0..99].ResourceManager.initialEnergy = 800
include ../Parameters/Castalia.ini
include ../Parameters/MAC/CSMA.ini
SN.wirelessChannel.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.Radio.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.MAC.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.Routing.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Application.collectTraceInfo = false
SN.node[*].SensorManager.collectTraceInfo = false
SN.node[*].ResourceManager.collectTraceInfo = false
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "BypassMAC"
SN.wirelessChannel.collectTraceInfo = false
SN.node[*].MobilityManager.collectTraceInfo = false
SN.wirelessChannel.onlyStaticNodes = true
SN.wirelessChannel.sigma = 0
SN.wirelessChannel.bidirectionalSigma = 0
SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 2.0      # Free Space
SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
SN.node[*].Communication.Routing.netBufferSize = 1000
SN.node[0].Communication.Routing.isSink = true
SN.node[*].Communication.Routing.slotLength = 0.2
SN.node[*].Communication.Routing.roundLength = 20s
SN.node[*].Communication.Routing.percentage = 0.05
SN.node[*].Communication.Routing.powersConfig = xmldoc("powersConfig.xml")
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.packet_rate = 1
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
SN.Node[0].Application.isSink = true

# *****#
#      Configuration Leach      #
# *****#
[Config LEACH]
SN.node[*].Communication.RoutingProtocolName = "LeachRouting"

# *****#
#      Configuration REL      #
# *****#
[Config REL]
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "-5"
SN.node[*].Communication.Radio.collisonModel = 0
SN.node[*].Communication.RoutingProtocolName = "RELRouting"

```

Figure 30 : code source du fichier d'initialisation omnet.ini

## IV. Exécution de la simulation et présentation des résultats Obtenus

### IV.1. Paramètres de simulation

La durée de la simulation est fixée à 200 secondes, la portée de communication et la valeur initiale de l'énergie sont fixées pour tous les nœuds. Le ci-dessous suivant résume les paramètres essentiels de la simulation :

<b>Rayon de transmission</b>	10 m
<b>Nombre de nœuds déployés</b>	Variable 16 / 24 / 32
<b>Energie Initiale</b>	800 Joules.
<b>Durée de Simulation</b>	300 secondes
<b>Technologie Radio utilisée</b>	CC2420
<b>Protocole MAC utilisé</b>	ByPassMac
<b>Couche Application</b>	ThroughputTest
<b>Protocoles de routage utilisés</b>	LeachRouting / RelRouting

Tableau 8 : Paramètres généraux de la simulation

### IV.2. Déploiement des capteurs sans fil

Parmi les inconvénients de Castalia c'est qu'on ne peut pas voir un déploiement des capteurs sans fil dans les endroits souhaités au cours de l'exécution c'est pourquoi en voie pas les capteurs bien placés sur l'image du corps humain. Cependant les fondateurs de castalia travaillent dessus pour l'amélioration de ce Simulateur.

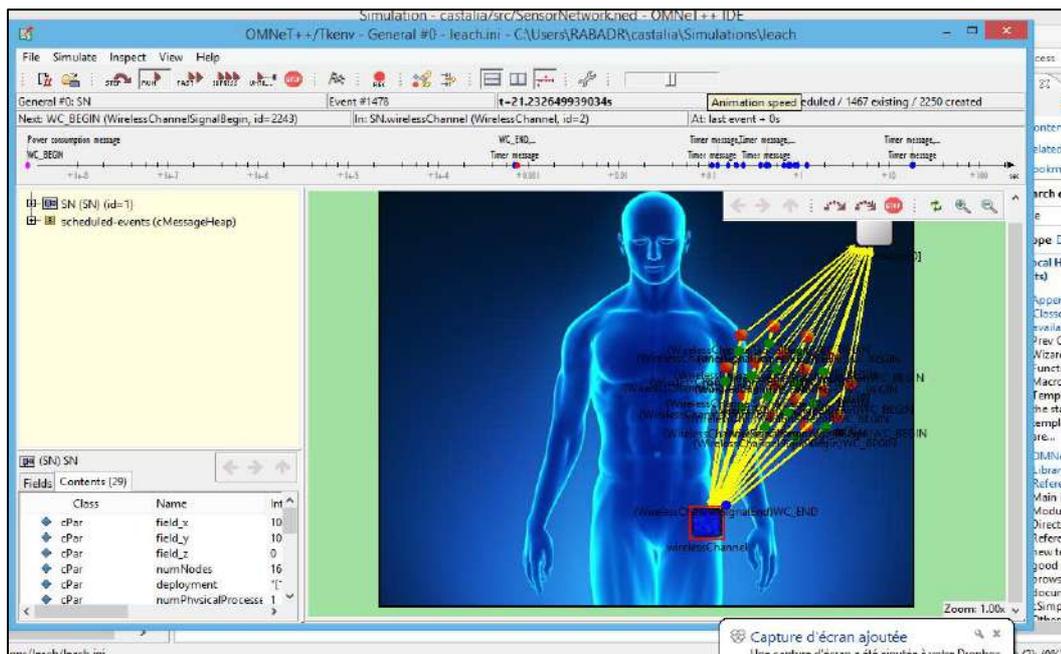


Figure 31 : Exemple d'exécution de la simulation du protocole LEACH

### IV.3. Fichiers résultats

#### IV.3.1. Fichier Trace :

Dans ce il est enregistré en détail le scénario de la simulation c.à.d. le processus parcouru par chaque nœud durant la simulation.

```

1.000899685963 SN.node[11].Communication.Routing Received [App generic packet] from application layer
1.000899685963 SN.node[11].Communication.Routing Packet buffered from application layer, buffer state: 1/32
1.001399685962 SN.node[0].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[1].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[2].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[3].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[4].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[5].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[6].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer
1.001399685962 SN.node[7].Communication.Routing Received [REL routing RADV packet] from MAC layer

```

*Figure 32 : exemple de contenu du fichier trace*

#### IV.3.2. Fichier Résumé :

Dans ce dernier ils sont enregistrés les valeurs résultat de la simulation (le nombre de packets transmis, reçus et perdus, la consommation d'énergie...etc.), c'est en exploitant ce fichier qu'on peut produire des présentations graphiques des résultats, d'ailleurs CASTALIA permet d'effectuer ceci en utilisant le mode ligne de commande et en exploitant le Framework GNUPlot destiné pour l'élaboration des présentations graphique des résultats de CASTALIA.

```

Castalia | what:[LEACH,REL] (1)
Castalia | when:2017-06-23 23:57
Castalia | label:LEACH,NbNode=16
Castalia |     module:SN.node[0].Communication.Radio
Castalia |         simple output name:RX pkt breakdown
Castalia |             152 Received with NO interference
Castalia |     module:SN.node[0].Application
Castalia |         index:3 simple output name:Packets received per node
Castalia |             12
Castalia |         index:4 simple output name:Packets received per node
Castalia |             6
Castalia |         index:6 simple output name:Packets received per node
Castalia |             17
Castalia |         index:7 simple output name:Packets received per node
Castalia |             6
Castalia |         index:8 simple output name:Packets received per node
Castalia |             6
Castalia |         index:10 simple output name:Packets received per node
Castalia |             18

```

*Figure 33 : exemple de contenu du fichier résumé*



*Figure 34 : exemple d'un graph représentant l'énergie consommée obtenu par ligne de commande.*

**Remarque :**

Vue que GNUPlot produit des présentation graphiques décalés dans la plupart des cas ce que peut influencer la lecture et l'interprétation des résultats obtenues nous favoriser d'exporter ces résultats vers Excel afin de produire des présentations graphiques plus claires et plus interprétables.

La comparaison des durées de vie des réseaux simulés fait ressortir ce qui suit :

- Le réseau basé sur le protocole de routage LEACH survit plus que le réseau basé sur le protocole REL puisque comme il a été constaté auparavant le protocole REL nécessite plus d'énergie que le protocole LEACH.
- Le changement du nombre de nœud dans la simulation n'a pas influencé la durée de vie du réseau REL, contrairement au cas du réseau LEACH où l'augmentation du nombre de nœud a entenu la durée de vie du réseau.

## **V. Conclusion**

Notre but de la simulation effectuée était de tester les performances des deux protocoles de routage (LEACH vs REL) en matière de consommation d'énergie et durée de vie du réseau nombre de paquet transmis, d'où nous avons pu comparer quelques résultats de ces deux protocoles de routage.

Cette étude est basée sur un ensemble des critères importants pour les réseaux de capteur sans fil corporels (consommation d'énergie, durée de vie du réseau, ...etc.).

En Basant sur résultats obtenus, nous pouvons déduire qu'en matière des critères que nous avons pu obtenir des résultats relatifs concluants à savoir consommation d'énergie et durée de vie du réseau, le protocole de routage LEACH présente des avantages majeurs en matière de ces deux critères par rapport au protocole REL.

IV.4. Présentation et discussions des résultats obtenus

IV.4.1. La Consommation d'énergie :

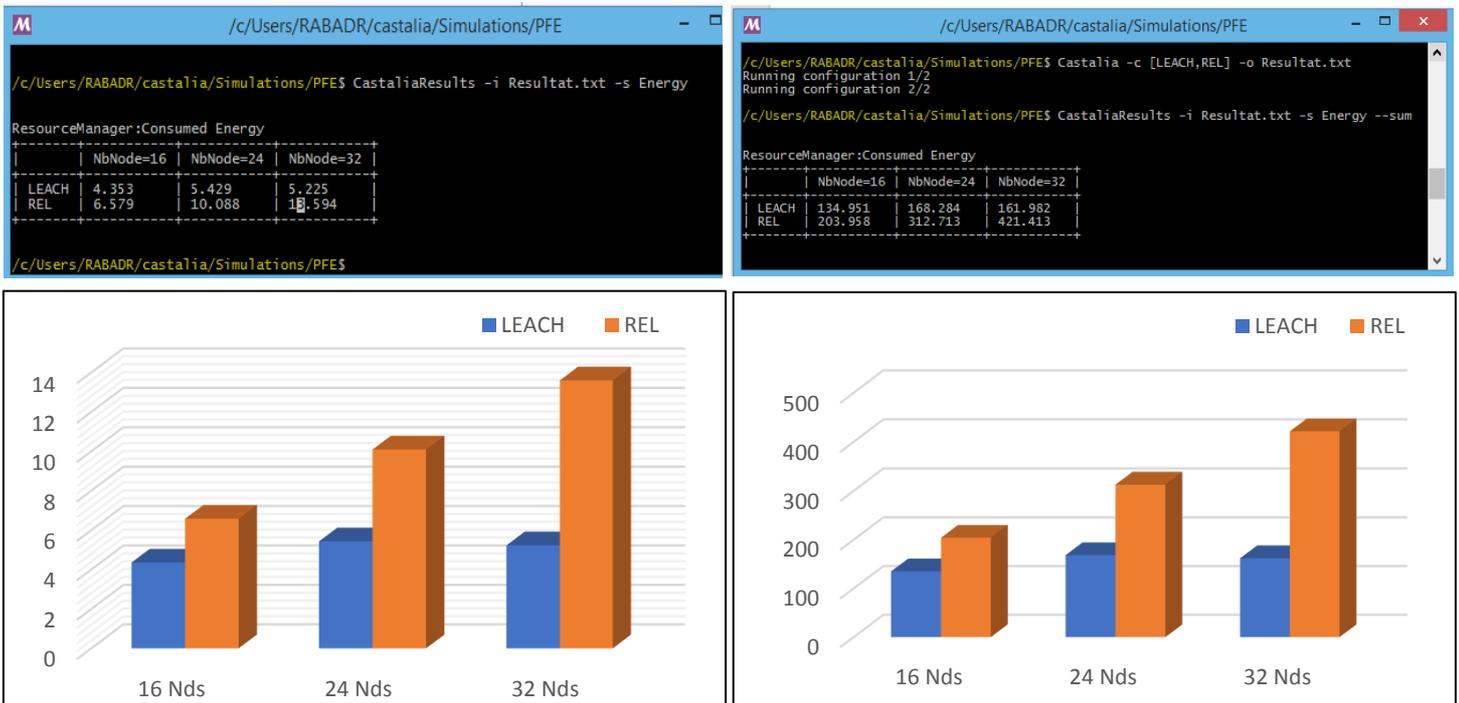


Figure 35 : L'énergie moyenne consommée par chaque nœud

Figure 36 : L'énergie totale consommée dans le réseau

La comparaison de l'énergie moyenne consommée par les nœuds dans les réseaux des deux protocoles de routage fait ressortir que l'énergie moyenne consommée par un nœud dans un réseau de capteurs qui fonctionne avec le protocole REL est plus importante que celle consommée par un nœud d'un réseau LEACH, ceci est due au nombre de traitements et de calculs de plus effectués par un nœud dans un réseau REL pour qu'il puisse sélectionner sa route d'envoi d'un paquet à chaque fois et par conséquent ; plus de traitements signifie plus de consommation d'énergie, contrairement pour le cas d'un réseau LEACH où une fois les Clusters Head (CHs) sont désignés chaque nœud envoie directement le paquet de données à son CH correspondant pendant un laps de temps.

Aussi on peut facilement remarquer que la différence de consommation d'énergie entre les deux protocoles augmente avec le nombre de nœuds dans le réseau (la différence de consommation entre LEACH et REL avec 24 nœuds est plus importante que celle du cas de 16 nœuds). Cela est justifié comme précédemment par : l'augmentation du nombre de nœuds implique l'augmentation du nombre de traitements de calcul de route implique plus d'énergie consommée.

IV.4.2. Nombre de paquet transmet :

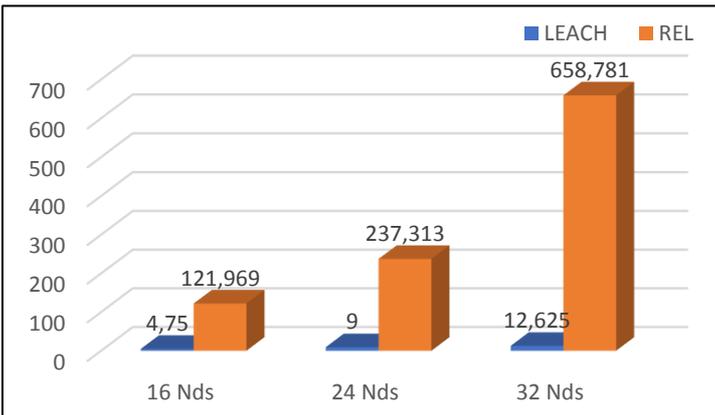
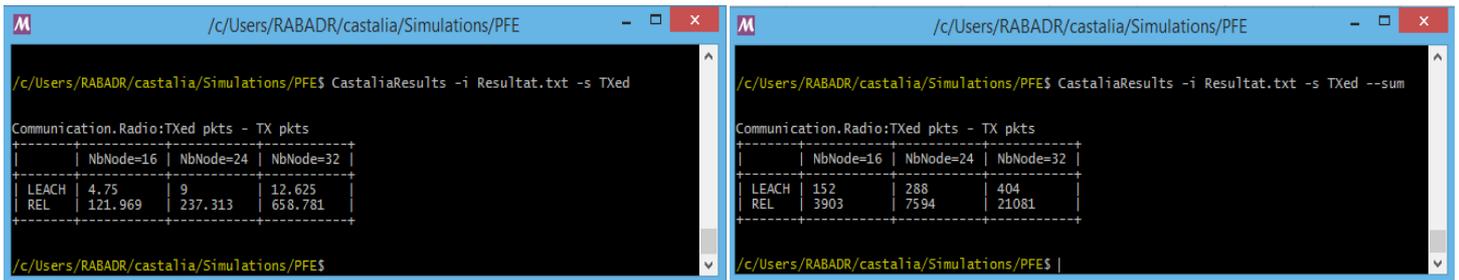


Figure 37 : Le nombre moyen de paquets transmits par chaque nœud

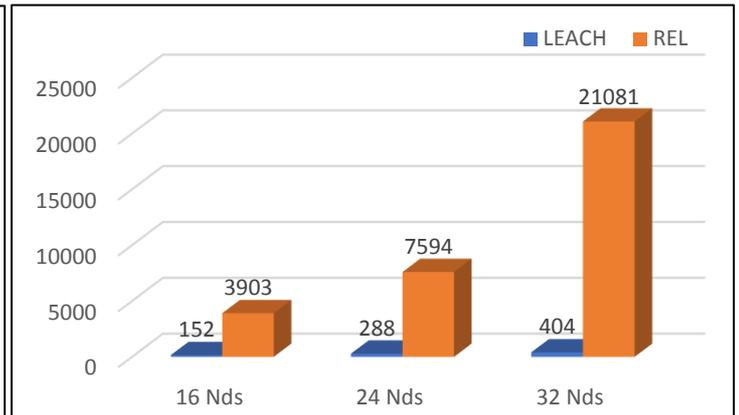


Figure 38 : Le nombre Total des paquets transmits à travers le réseau

La comparaison du nombre moyen de paquets transmits par chaque nœud dans les réseaux des deux protocoles de routage fait ressortir que le nombre moyen de paquets transmits par un nœud dans un réseau de capteurs qui fonctionne avec le protocole REL est plus importante par rapport à celui transmet par un nœud dans réseau LEACH, ceci pourra être justifié par le nombre de paquet RREQ et RREP envoyés et réceptionnés dans un réseau REL par chaque nœud dans les opération de calcul et de sélection des routes d’envoi.

Par ailleurs on constate que l’augmentation du nombre de nœud dans la simulation augmente de le nombre de paquets transmits dans le réseau d’une façon exponentiel dans le cas du protocole REL, tandis que l’augmentation dans le cas du réseau LEACH est plus au moins, moins importante par rapport au protocole REL.

**IV.4.3. Durée de vie du réseau :**

Dans le monde des réseaux de capteurs sans fil, il existe plusieurs manières de calcul de la durée de vie réseau, par exemple certains chercheurs considèrent un réseau de capteurs sans fil mort une fois un capteur dans le réseau est mort, d'autres considèrent le mort une fois le nombre de capteurs en vie est arrivé à moins de 50%...etc.

Pour calculer la durée de vie d'un nœud capteur nous avons calculé dans les deux cas de figures (16 nœuds et 32 nœuds) et pour chaque nœud la durée de temps nécessaire pour épuiser toute l'énergie de sa batterie.

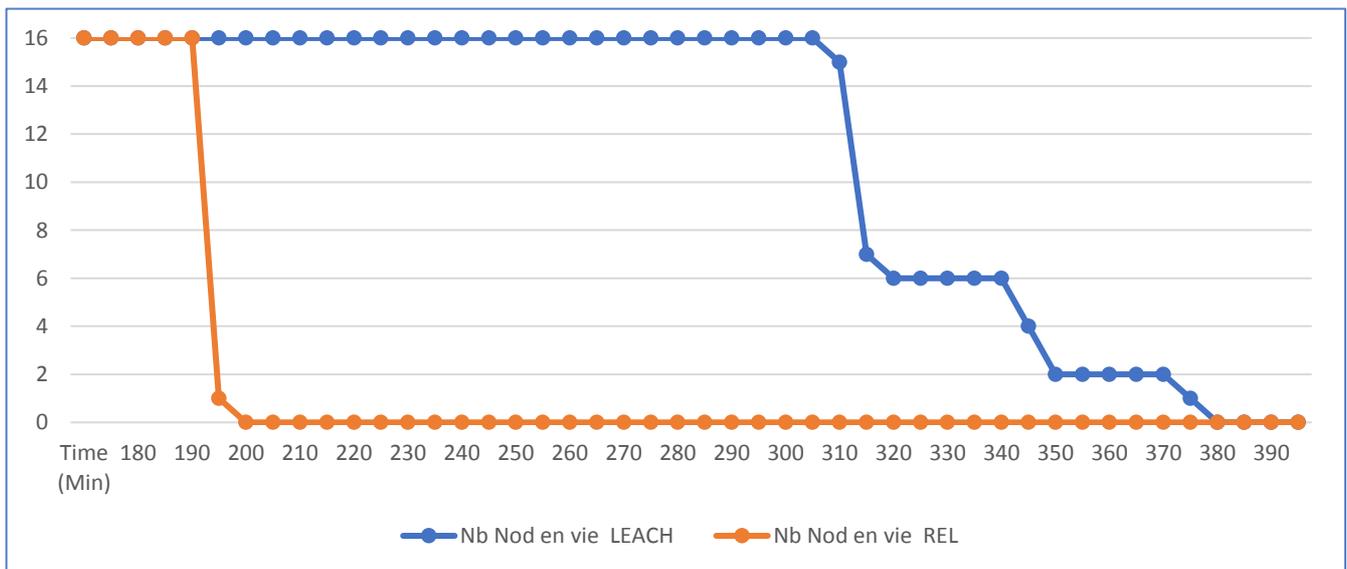


Figure 39 : Durée de vie d'un réseau de 16 nœuds capteurs

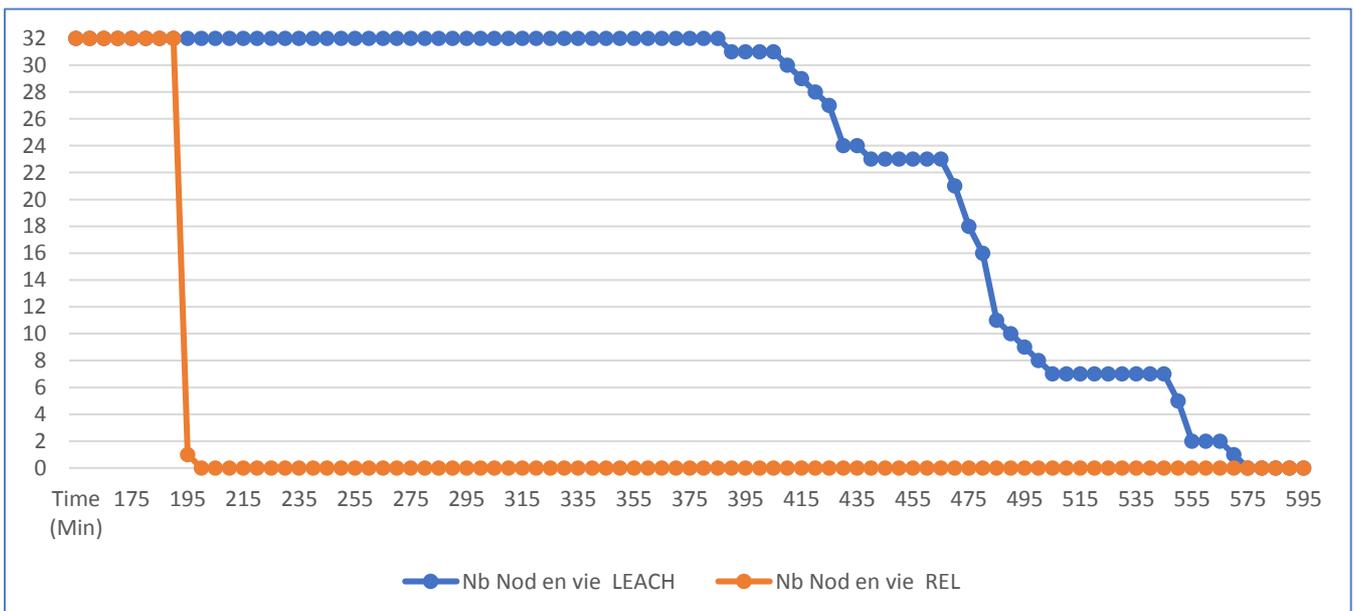


Figure 40 : Durée de vie d'un réseau de 32 nœuds capteurs

# **CONCLUSION GENERALE**

## *Conclusion Générale*

---

---

L'avènement récent de la technologie des réseaux de capteurs sans-fil, conjugué au progrès de miniaturisation des composants et à l'allongement de la durée de vie des batteries, annoncent un futur prometteur à cette technologie. De plus, le développement de nouveaux capteurs plus performants permettra d'étendre d'avantage les domaines d'applications déjà important.

Dans le cadre de notre étude comparative, on s'est intéressé à certains critères relatifs à la performance des capteurs sans fil et particulièrement la consommation énergétique au niveaux des Réseaux de Capteurs corporels (WBAN) qui représente est un point sensible, ce qui a motivé les chercheurs à se focaliser plus sur cette problématique pour pouvoir allonger la durée de vie des WBANs.

La simulation est fondamentale avant le déploiement en environnement réel, en raison des avantages qu'elle offre et plus particulièrement en matière de coût et de tests qui peuvent être réalisés dans les conditions extrêmes.

De ce fait, deux protocoles de routage destinés aux WBANs et appartenant à deux classes différentes ont été sélectionnés pour être comparés l'un avec l'autre, et cela en utilisant des outils de simulation convenables.

Dans notre travail nous avons effectué une comparaison entre deux protocoles de routage (LEACH et REL).

Afin de valider la comparaison entre les deux protocoles en terme de prolongement de temps de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique, nous avons simulé le fonctionnement ces Protocoles avec le simulateur OMNeT++ en exploitant les fonctionnalités de la plateforme "Castalia" recommandée pour les réseaux WBANs.

Les résultats que nous avons pu obtenir montrent quelques avantages en faveur du protocole de routage LEACH par rapport au protocole REL notamment en matière de consommation d'énergie et en termes de durée de vie du réseau, les frais généraux de la communication et le pourcentage de décès de nœuds. LEACH offre également une durée de vie prolongée du réseau en raison de l'efficacité énergétique.

Enfin, et comme perspectives nous suggérons d'entamer d'autres comparaisons entre d'autres protocoles de routage appartenant à une même classe ou à des classes différentes peut importe afin d'approfondir la compréhension du fonctionnement de plusieurs protocoles de routage et aussi d'étudier les performances de chaque protocole étudié ce que va forcément et avec le temps nous amener à en déduire quel protocole de routage doit-on recommander pour qu'il soit implémenté dans les capteurs des réseaux WBANs ?

Finalement, nous devons dire que nous avons eu beaucoup de plaisir en traitant ce sujet qui nous a motivés à bien dans ce type de réseaux.

## LISTE DES ACRONYMES

---

### LISTE DES ACRONYMES

**API** : Interface de programmation d'applications

**ALTR**: Adaptive Least Temperature Rise

**CDMA**: Code Division Multiple Access

**CICADA**: Controlling Access with Distributed slot Assianment

**CH**: Cluster-Head

**CPs** : Paquets de données critiques

**CSMA** : Carrier Sense Multiple Access

**DMQoS** : Data-Centric Multi-Objectives QoS-Aware Routing

**DSP**: Delay Sensitive Packets

**DVR- PLC**: Distance Victor routing with postural link costs

**ECG**: Electro Cardio Graphic

**EPR** : Energy-Aware Peering Routing

**FCFS**: First-Come-First-Serve

**GPS**: Global Position System

**GSM** : Global System for Mobile Communication

**HIT**: Hybrid Indirect Transmission

**HPR** : Hotspot Preventing Routing

**IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineer

**IoT** : Internet of Things

**LEACH** : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

**LQE** : Link Quality Estimator

**LQI**: Link Quality Indicator

**LTR** : Least Temperature Rise

## **LISTE DES ACRONYMES**

---

**LTRT** : Least Total Route Temperature

**MAC** : Medium Access Control

**OBSFR** : On-Body Store and Forward Routing

**PER**: Packet Error Rate

**PDR**: Packet Delivery Ratio

**PSR** : Prediction-based Secure and Reliable routing

**PRPLC** : Probabilistic Routing with postural link costs

**QoS** : Quality Of Service

**QPRD** : QoS-Aware Peering Routing for Delay-Sensitive Data

**QPRR** : QoS-Aware Peering Routing for Reliability-Sensitive Data

**RADV** : Route Advisor

**RAIN**: Routing algorithm for networks of homogenous and Id-less biomedical sensor nodes

**REL**: Routing Protocol Based on Energy and Link Quality

**RCSF** : Réseaux de capteurs sans fil

**RREQ**: Route Request Message

**RREP**: Route Reply

**RL-QRP** : Reinforcement Learning based Routing Protocol with QoS

**RSSI**: Received Signal Strength Indication

**SNR** : Signal-Noise-Ratio

**TARA** : Thermal-Aware Routing Algorithm

**TDMA**:Time Division Multiple Access

**TSHR** : Thermal-Aware Shortest Hop Routing

**WASP** : Wireless Autonomous Spanning Tree Protocol

**WBAN** : Wireless Body Area Network

**WPAN** : Wireless Personnel Area Network

**WSN** : Wireless Sensor Network

### Bibliographie

- 1- Organisation mondiale de la Santé [enligne]: ‘<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/fr/>’, consulter le 24/06/2016.
- 2- Fédération Internationale du Diabète [enligne] : ‘<http://www.idf.org/about-diabetes/facts-figures>’, consulter le 24/06/2016.
- 3- Campbell, P. R. (1997). Population projections: states, 1995-2025 (No. 1131). Census Bureau.
- 4- Cypher, D., Chevrollier, N., Montavont, N., & Golmie, N. (2006). Prevailing over wires in healthcare environments: benefits and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 44(4), 56-63.
- 5- Istepanian, R. S., Jovanov, E., & Zhang, Y. T. (2004). Guest editorial introduction to the special section on m-health: Beyond seamless mobility and global wireless health-care connectivity. *IEEE Transactions on information technology in biomedicine*, 8(4), 405-414.
- 6- Jafari, R., Encarnacao, A., Zahoory, A., Dabiri, F., Noshadi, H., & Sarrafzadeh, M. (2005, July). Wireless sensor networks for health monitoring. In *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services* (pp. 479-481). IEEE.
- 7- Van Dam, K., Pichers, S., & Barnard, M. (2001, March). Body area networks: Towards a wearable future. In *Proc. WWRF kick off meeting, Munich, Germany* (pp. 6-7).
- 8- Schmidt, R., Norgall, T., Mörsdorf, J., Bernhard, J., & von der Grün, T. (2002). Body Area Network BAN– a key infrastructure element for patient-centered medical applications. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*, 47(s1a), 365-368.
- 9- Gyselinckx, B., Van Hoof, C., Ryckaert, J., Yazicioglu, R. F., Fiorini, P., & Leonov, V. (2005, September). Human++: autonomous wireless sensors for body area networks. In *Proceedings of the IEEE 2005 Custom Integrated Circuits Conference, 2005.* (pp. 13-19). IEEE.
- 10- Otto, C., Milenkovic, A., Sanders, C., & Jovanov, E. (2006). System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring. *Journal of mobile multimedia*, 1(4), 307-326.
- 11- Yang, G. Z. (2006, July). Body sensor networks: Infrastructure for life science sensing research. In *2006 IEEE/NLM Life Science Systems and Applications Workshop* (pp. 1-2). IEEE.
- 12- Jurik, A. D., & Weaver, A. C. (2008). Remote medical monitoring. *Computer*, 41(4), 96-99.

## Références bibliographiques

---

- 13- Otto, C., Milenković, A., Sanders, C., & Jovanov, E. (2005). © Rinton Press SYSTEM ARCHITECTURE OF A WIRELESS BODY AREA SENSOR NETWORK FOR UBIQUITOUS HEALTH MONITORING.
- 14- Hanson, M. A., Powell Jr, H. C., Barth, A. T., Ringgenberg, K., Calhoun, B. H., Aylor, J. H., & Lach, J. (2009). Body area sensor networks: Challenges and opportunities. *Computer*, 42(1), 58.
- 15- Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., & Leung, V. C. (2011). Body area networks: A survey. *Mobile networks and applications*, 16(2), 171-193.
- 16- Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., ... & Kwak, K. S. (2012). A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of medical systems*, 36(3), 1065-1094.
- 17- Astrin, A. W., Huan-Bang, L. I., & Kohno, R. (2009). Standardization for body area networks. *IEICE transactions on communications*, 92(2), 366-372.
- 18- Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., & Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks*, 17(1), 1-18.
- 19- Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., & Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3), 1658-1686.
- 20- Wang, B., & Pei, Y. (2007). Body area networks. *Encyclopedia of Wireless and Mobile Communications*, Edited by Borko Furht, Taylor and Francis, 98.
- 21- S. Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., ... & Kwak, K. S. (2012). A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of medical systems*, 36(3), 1065-1094.
- 22- Chen, Z., Hu, C., Liao, J., & Liu, S. (2008, September). Protocol architecture for wireless body area network based on nRF24L01. In *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics* (pp. 3050-3054). IEEE □
- 23- Lewis, D. (2008). 802.15. 6 call for applications-response summary. *IEEE P802*, 15.
- 24- Ullah, S., Khan, P., Ullah, N., Saleem, S., Higgins, H., & Kwak, K. S. (2010). A review of wireless body area networks for medical applications. *arXiv preprint arXiv:1001.0831*.
- 25- Hanson, M. A., Powell Jr, H. C., Barth, A. T., Ringgenberg, K., Calhoun, B. H., Aylor, J. H., & Lach, J. (2009). Body area sensor networks: Challenges and opportunities. *Computer*, 42(1), 58.
- 26- Wang, S., & Park, J. T. (2010). Modeling and analysis of multi-type failures in wireless body area networks with semi-Markov model. *IEEE Communications Letters*, 14(1), 6-8.
- 27- Yazdandoost, K. Y., & Sayrafian-Pour, K. (2009). Channel model for body area network (BAN). *IEEE P802*, 15, 08-0780.
- 28- IEEE p802.15-07-0867-04-0ban, in 15-10-0245-06-0006, Oct. 2007.

## Références bibliographiques

---

- 29- IEEE p802.15.6/d0 draft standard for body area network, IEEE Draft, 2010.
- 30- Lewis, D. (2010). IEEE P802. 15.6 D04 Draft Trial-Use Standard for Body Area Network. IEEE 802.15 WPAN.
- 31- IEEE p802. 15-10 wireless personal area networks, July, 2011.
- 32- Zhen, B., Patel, M., Lee, S., Won, E., & Astrin, A. (2008). TG6 technical requirements document (TRD). IEEE P802, 15-08.
- 33- Zhang, A., Smith, D. B., Miniutti, D., Hanlen, L. W., Rodda, D., & Gilbert, B. (2010, April). Performance of piconet co-existence schemes in wireless body area networks. In 2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference (pp. 1-6). IEEE.
- 34- Hanlen, L. W., Miniutti, D., Smith, D., Rodda, D., & Gilbert, B. (2010). Co-channel interference in body area networks with indoor measurements at 2.4 GHz: Distance-to-interferer is a poor estimate of received interference power. *International Journal of Wireless Information Networks*, 17(3-4), 113-125.
- 35- Zasowski, T., Althaus, F., Stager, M., Wittneben, A., & Troster, G. (2003, November). UWB for noninvasive wireless body area networks: channel measurements and results. In *Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on* (pp. 285-289). IEEE.
- 36- Theogarajan, L., Wyatt, J., Rizzo, J., Drohan, B., Markova, M., Kelly, S., ... & Lowenstein, J. (2006, February). Minimally invasive retinal prosthesis. In 2006 IEEE International Solid State Circuits Conference-Digest of Technical Papers.
- 37- Penzel, T., Kemp, B., Klosch, G., Schlögl, A., Hasan, J., Varri, A., & Korhonen, I. (2001). Acquisition of biomedical signals databases. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 20(3), 25-32.
- 38- Arnon, S., Bhastekar, D., Kedar, D., & Tauber, A. (2003). A comparative study of wireless communication network configurations for medical applications. *IEEE Wireless Communications*, 10(1), 56-61.
- 39- Paradiso, J. A., & Starner, T. (2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive computing*, 4(1), 18-27.
- 40- Gyselinx, B., Penders, J., & Vullers, R. (2007). Potential and challenges of body area networks for cardiac monitoring. *Journal of electrocardiology*, 40(6), S165-S168.
- 41- Ullah, S., Khan, P., Ullah, N., Saleem, S., Higgins, H., & Kwak, K. S. (2010). A review of wireless body area networks for medical applications. arXiv preprint arXiv:1001.0831..
- 42- Jovanov, E., Milenkovic, A., Otto, C., & De Groen, P. C. (2005). A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and rehabilitation*, 2(1), 1.
- 43- Bhargava, A., & Zoltowski, M. (2003, September). Sensors and wireless communication for medical care. In *Database and Expert Systems Applications, 2003. Proceedings. 14th International Workshop on* (pp. 956-960). IEEE.
- 44- Tachtatzis, C., Di Franco, F., Tracey, D. C., Timmons, N. F., & Morrison, J. (2011, September). An energy analysis of IEEE 802.15. 6 scheduled access modes for medical

## Références bibliographiques

---

applications. In International Conference on Ad Hoc Networks (pp. 209-222). Springer Berlin Heidelberg.

45- Shah, R. C., & Yarvis, M. (2006, September). Characteristics of on-body 802.15. 4 networks. In 2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (pp. 138-139). IEEE.

46- Natarajan, A., Motani, M., de Silva, B., Yap, K. K., & Chua, K. C. (2007, June). Investigating network architectures for body sensor networks. In Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments (pp. 19-24). ACM.

47- IEEE Standards Association. (2012). IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.6: wireless body area networks. IEEE Standard for Information Technology, IEEE, 802(6), 1-271.

48- Sukor, M., Ariffin, S., Faisal, N., Yusof, S. S., & Abdallah, A. (2008, May). Performance study of wireless body area network in medical environment. In 2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS) (pp. 202-206). IEEE.

49- IEEE 802.11 Working Group. (2010). IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments. IEEE Std, 802, 11p.

50- Chlamtac, I., Conti, M., & Liu, J. J. N. (2003). Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges. *Ad hoc networks*, 1(1), 13-64.

51- Kwak, K. S., Ullah, S., & Ullah, N. (2010, November). An overview of IEEE 802.15. 6 standard. In 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010) (pp. 1-6). IEEE.

52- Cao, H., Leung, V., Chow, C., & Chan, H. (2009). Enabling technologies for wireless body area networks: A survey and outlook. *IEEE Communications Magazine*, 47(12), 84-93.

53- <http://www.z-wave.com>, consulté le 20/09/2016.

54- [http://www.zarlink.com/zarlink/hs/medical Wireless Telemetry.htm](http://www.zarlink.com/zarlink/hs/medical%20Wireless%20Telemetry.htm) , consulté le 20/09/2016.

55- [www.rubee.com](http://www.rubee.com), consulté le 20/09/2016.

56- [www.thisisant.com](http://www.thisisant.com) , consulté le 20/09/2016.

57- [http://www.toumaz.com/page.php/page.sensium intro](http://www.toumaz.com/page.php/page.sensium%20intro) , consulté le 20/09/2016.

58- Yu, X., Xia, X., & Chen, X. (2011, May). Design and application of rubee-based telemedicine data acquisition system. In Computer and Information Science (ICIS), 2011 IEEE/ACIS 10th International Conference on (pp. 365-370). IEEE.

59- Movassaghi, S., Arab, P., & Abolhasan, M. (2012, October). Wireless technologies for body area networks: Characteristics and challenges. In Communications and Information Technologies (ISCIT), 2012 International Symposium on (pp. 42-47). IEEE.

## Références bibliographiques

---

- 60- Li, H. B., Takizawa, K. I., Zhen, B., & Kohno, R. (2007, July). Body area network and its standardization at IEEE 802.15. MBAN. In 2007 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit (pp. 1-5). IEEE.
- 61- Yang, G. Z., & Yacoub, M. (2006). Body sensor networks.
- 62- Abolhasan, M., Wysocki, T., & Dutkiewicz, E. (2004). A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Ad hoc networks*, 2(1), 1-22.
- 63- Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3), 325-349.
- 64- Cheng, S. H., & Huang, C. Y. (2013). Coloring-based inter-WBAN scheduling for mobile wireless body area networks. *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, 24(2), 250-259.
- 65- Cavalcanti, D., Schmitt, R., & Soomro, A. (2007). Performance analysis of 802.15. 4 and 802.11 e for body sensor network applications. In 4th International workshop on wearable and implantable Body Sensor Networks (BSN 2007) (pp. 9-14). Springer Berlin Heidelberg.
- 66- Farella, E., Pieracci, A., Benini, L., & Acquaviva, A. (2006, June). A wireless body area sensor network for posture detection. In 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06) (pp. 454-459). IEEE.
- 67- Heile, B. (2007). IEEE 802.15 TG 6 PAR. IEEE15-07-0575/r9, IEEE-SA.
- 68- Rüdiger, M., Maria, F., Rodney, C., Adele, G., Kari, J., Carmela, M., ... & Zenon, S. (2014). (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time-Varying Magnetic Fields below 1 Hz. *Health Physics*, 106-418.
- 69- Lewis, D. (2008). 802.15 TG 6 Call for Applications-Response Summary," IEEE15-08-0407r6. IEEE-SA, July.
- 70- Watteyne, T., Augé-Blum, I., Dohler, M., & Barthel, D. (2007, June). Anybody: a self-organization protocol for body area networks. In Proceedings of the ICST 2nd international conference on Body area networks (p. 6). ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- 71- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000, January). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on (pp. 10-pp). IEEE.
- 72- Culpepper, B. J., Dung, L., & Moh, M. (2004). Design and analysis of Hybrid Indirect Transmissions (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 8(1), 61-83.
- 73- Moh, M., Culpepper, B. J., Dung, L., Moh, T. S., Hamada, T., & Su, C. F. (2005, December). On data gathering protocols for in-body biomedical sensor networks. In

## Références bibliographiques

---

GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005. (Vol. 5, pp. 6-pp). IEEE.

74- Braem, B., Latre, B., Moerman, I., Blondia, C., & Demeester, P. (2006, July). The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks. In 2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services (pp. 1-8). IEEE.

75- Braem, B., Latré, B., Blondia, C., Moerman, I., & Demeester, P. (2008, August). Improving reliability in multi-hop body sensor networks. In Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM'08.

Second International Conference on (pp. 342-347). IEEE.

76- Latre, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., Reusens, E., Joseph, W., & Demeester, P. (2007, August). A low-delay protocol for multihop wireless body area networks. In Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services, 2007. MobiQuitous 2007. Fourth Annual International Conference on (pp. 1-8). IEEE.

77- Singelée, D., Latré, B., Braem, B., Peeters, M., De Soete, M., De Cleyn, P., ... & Blondia, C. (2008, September). A secure cross-layer protocol for multi-hop wireless body area networks. In International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless (pp. 94-107). Springer Berlin Heidelberg.

78- Bag, A., & Bassiouni, M. A. (2009). Biocomm—A cross-layer medium access control (MAC) and routing protocol co-design for biomedical sensor networks. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 24(1), 85-103.

79- Liang, X., Li, X., Shen, Q., Lu, R., Lin, X., Shen, X., & Zhuang, W. (2012, March). Exploiting prediction to enable secure and reliable routing in wireless body area networks. In INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE (pp. 388-396). IEEE.

80- Quwaider, M., & Biswas, S. (2009, October). Probabilistic routing in on-body sensor networks with postural disconnections. In Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobility management and wireless access (pp. 149-158). ACM.

81- Quwaider, M., & Biswas, S. (2010). DTN routing in body sensor networks with dynamic postural partitioning. *Ad Hoc Networks*, 8(8), 824-841.

82- Quwaider, M., & Biswas, S. (2009, December). On-body packet routing algorithms for body sensor networks. In Networks and Communications, 2009. NETCOM'09. First International Conference on (pp. 171-177). IEEE.

83- Movassaghi, S., Abolhasan, M., & Lipman, J. (2012, September). Energy efficient thermal and power aware (ETPA) routing in body area networks. In 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC) (pp. 1108-1113). IEEE.

84- Djenouri, D., & Balasingham, I. (2009, September). New QoS and geographical routing in wireless biomedical sensor networks. In 2009 Sixth International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems (pp. 1-8). IEEE.

## Références bibliographiques

---

- 85- Razzaque, M. A., Hong, C. S., & Lee, S. (2011). Data-centric multiobjective QoS-aware routing protocol for body sensor networks. *Sensors*, 11(1), 917-937.
- 86- Liang, X., & Balasingham, I. (2007, October). A QoS-aware routing service framework for biomedical sensor networks. In 2007 4th International Symposium on Wireless Communication Systems (pp. 342-345). IEEE.
- 87- Tang, Q., Tummala, N., Gupta, S. K., & Schwiebert, L. (2005). Communication scheduling to minimize thermal effects of implanted biosensor networks in homogeneous tissue. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52(7), 1285-1294.
- 88- Tang, Q., Tummala, N., Gupta, S. K., & Schwiebert, L. (2005, June). TARA: thermal-aware routing algorithm for implanted sensor networks. In *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems* (pp. 206-217). Springer Berlin Heidelberg. □
- 89- Bag, A., & Bassiouni, M. A. (2006, October). Energy efficient thermal aware routing algorithms for embedded biomedical sensor networks. In 2006 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (pp. 604-609). IEEE.
- 90- Bag, A., & Bassiouni, M. A. (2007, May). Hotspot preventing routing algorithm for delay-sensitive biomedical sensor networks. In *Portable Information Devices, 2007. PORTABLE07. IEEE International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- 91- Bag, A., & Bassiouni, M. A. (2008, February). Routing algorithm for network of homogeneous and id-less biomedical sensor nodes (RAIN). In *Sensors Applications Symposium, 2008. SAS 2008. IEEE* (pp. 68-73). IET.
- 92- Ahourai, F., Tabandeh, M., Jahed, M., & Moradi, S. (2009, April). A thermal-aware shortest hop routing algorithm for in vivo biomedical sensor networks. In *Information Technology: New Generations, 2009.ITNG'09. Sixth International Conference on* (pp. 1612-1613). IEEE.
- 93- Bilge Cetin, "SIMULATION ENVIRONMENT", Novembre 2005.
- 94-Andréas TIMM-GIEL, Ken MURRAY, Markus BECKER, Ciaran LYNCH, Carmelita GÔRG, Dirk PESCH, "Comparative Simulations ofWSN", ICT-MobileSummit 2008.
- 95- Abdallah Makhoul, "Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données.", THÈSE pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'Université de Franche-Comté Spécialité : Informatique préparée au Laboratoire d'informatique de l'Université de Franche-Comté (LIFC) dans le cadre de l'École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (SPIM), 2008.
- 96- C. Mallanda, A. Suri, V. Kunchakarra, S.S. Iyengar\*,R. Kan- nan\* and A. Durresi "Simulating Wireless Sensor Networks with OMNeT++", S. Sastry The University of Akron, Akron, Ohio.
- 98- " A Qidck OverView ofthe OMNeT++4.0 IDE ”
- 99-"OMNeT++, Discrete Event Simulation System Version 4.0", User Manual.
- 100- Azadeh Abdolrazaghi, "Unifying Wireless Sensor Network Simulators", Master's Degree Project Stockholm, Sweden,2009.

## Références bibliographiques

---

- 101- " OMNeT++ Installation Guide Version 4.1 ",2010 P,Q
- 102- Marc Lobbers, Daniel Willkomm, "A Mobility Framework for OMNeT++ User Manual Version 1.0a4", 2007.
- 103- Witold Drytkiewicz, Steffen Sroka, Vlado Handziski, Andréas Kopke, Holger Karl, "A Mobility Framework for OMNeT++", Télécommunication Networks Group Technische Universität Berlin, 2003.
- 104- LIANG LI," Implementing Transport Protocol PSFQ in Sensor Network in Castalia ", School of Computer Science, 2009
- 105- Maya Sayad "Energy Efficient Protocol (EEP) : un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique ; 2008/2009.
- 106- A. Boulis, "Castalia, a simulator for wireless sensor networks and body area networks, version 3.1", User's manual, NICTA, December 2010.
- 107- Min Chen, Sergio Gonzalez, Athanasios Vasilakos, Huasong Cao and Victor C. M. Leung,  
"Body Area Networks: A Survey", Mob. Netw. Appl. Journal, pages: 171-193, April 2011.
- 108-Kyung Sup Kwak, Sana Ullah, and Niamat Ulla, "An Overview of IEEE 802.15.6 Standard", 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), pages: 1-6, 2010.
- 109- A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality for Internet of Things Applications ,Article, Sensors 2013, 13, 1942-1964; doi:10.3390/s130201942
- 111- Baccour, N.; Koubaa, A.; Youssef, H.; Jamaa, M.B.; Rosario, D.; Becker, L.B.; Alves, M. F-LQE:
- 110-W..R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H.Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro sensor Networks", IEEE Transactions on the wireless communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- 111- A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 7th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN), Coimbra, Portugal, 17–19 February 2010; pp.240–255.
112. Baccour, N.; Koubaa, A.; Youssef, H.; Jamaa, M.B.; Rosario, D.; Becker, L.B.; Alves, M. F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 7th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN), Coimbra, Portugal, 17–19 February 2010; pp.240–255.
- 113- Srinivasan, K.; Dutta, P.; Tavakoli, A.; Levis, P. An empirical study of low-power wireless. ACM Trans. Sens. Netw. 2010, 6, 1–48.

## Références bibliographiques

---

114- Radi, M.; Dezfouli, B.; Bakar, K.; Lee, M. Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges. *Sensors* 2012, 12, 650–685.

### **Webographie**

<http://www.commentcamarche.net>, site de documentation informatique, Septembre 2005.

<http://www.francetelecom.com/rd>, site de la division R et D de Francetelecom, Septembre 2005.

<http://www.epfl.ch>, site de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Septembre 2005.

<http://compilers.cs.ucla.edu/avrora>, site d'informations sur le simulateur Avrora, Novembre 2005.