

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : *Télécommunications*

Spécialité : (*Réseaux de Télécommunications*)

Par:

**BESSADDOUG ABDALLAH**

**BOUDJEMAI ILYES**

Sujet

**CLUSTERING ET ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS CORPORELS SANS FILS**

Soutenu, le 07 /07/ 2021 , devant le jury composé de :

<i>Mr. IRID El Hadj</i>	<i>MCA</i>	<i>Univ. Tlemcen</i>	<i>Président</i>
<i>Mr. HADJILA Mourad</i>	<i>MCA</i>	<i>Univ. Tlemcen</i>	<i>Examinateur</i>
<i>Ma. BENLALDJ Lamia</i>	<i>MAA</i>	<i>Univ. Tlemcen</i>	<i>Encadreur</i>

**Année universitaire 2020-2021**

# *Remerciements*

*En tout premier lieu, nous tenons à remercier le bon Dieu, tout puissant et miséricordieux, de nous avoir donné la volonté, la force, ainsi que le courage pour dépasser toutes les difficultés afin d'accomplir ce travail.*

*Nous voudrions également exprimer notre profonde gratitude, notre considération, et nos grands remerciements à notre encadrante Madame BENLALDJ Lamia maître assistante à l'université Abou-Bekr Belkaid, pour sa grande patience, ses conseils et sa disponibilité. Sa compétence a rendu ce travail particulièrement intéressant.*

*Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir cette modeste contribution.*

*Nos vifs remerciement vont à, Monsieur IRID El Hadj maître de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.*

*On remercie également Monsieur HADJILA Mourad maître de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par ses propositions.*

*Nous voudrions adresser nos remerciements à tous les enseignants du département des télécommunications et le personnel de la faculté de Technologie de Tlemcen qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

*Que ce travail soit pour le gage de notre profonde estime à tous nos amis.*

*Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé à la réalisation de ce travail.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mon cher père et ma chère mère,*

*Qui n'ont jamais cessé, de m'encourager durant ces années d'études, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs, que dieu les garde et les protège.*

*Mes frères, MOHAMED, MOSTAPHA, AHMED ET MOUSA.*

*Pour leurs soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

*Toute ma famille,*

*Mes amis, ILYES, NADIR, BOUYA, MAGHNON, LEKHDAR,  
ABDESSATAR, BOUELAM, BELKACEM, OMAR, AHMED*

*Tous mes enseignants et toute la promotion Master II □*

*Réseaux de Télécommunication 2020 / 2021.*

*Abdallah*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mon cher père et ma chère mère,*

*Qui n'ont jamais cessé, de m'encourager durant ces années d'études, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs, que dieu les garde et les protège.*

*Mes frères et ma sœur.*

*Pour leurs soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

*Toute ma famille,*

*Mes amis, ABDALLAH, YACER, YACINE, NADIR, BOUYA,*

*Tous mes enseignants et toute la promotion Master II*

*Réseaux de Télécommunication 2020 / 2021.*

*TOUS MES AMIS DE CITÉ MANSORAH 4.*

*ILYÈS*

## Résumé

Le réseau corporel sans fil (WBAN) se compose de différents nœuds hétérogènes situés à la surface ou à l'intérieur du corps humain pour servir diverses applications. WBAN est une solution prometteuse dans le domaine de la santé. Les protocoles de routage ont un effet évident sur l'efficacité du WBAN. Cependant, les protocoles de routage actuels du réseau de capteurs sans fil ne sont pas applicables au WBAN en raison de leurs limitations de performances, en particulier dans le corps humain. Dans cette étude, un nouveau protocole de routage est proposé pour WBAN en utilisant la technique de clustering FCM et où la fonction de l' énergie résiduelle est utilisée pour un choix dynamique de CH à chaque tour. Une évaluation des performances de ce protocole de routage WBAN pour les applications médicale est présentée. Le protocole est évalué en termes de consommation d'énergie, de stabilité, et de durée de vie du réseau.

**Mots clés :** réseau WBAN, protocole de routage, clustering, efficacité énergétique.

## Abstract

The Wireless Body Area Network (WBAN) consists of different heterogeneous nodes located on the surface or inside the human body to serve various applications. WBAN is a promising solution in the healthcare sector. Routing protocols have a clear effect on the efficiency of the WBAN. However, current wireless sensor network routing protocols are not applicable to WBAN due to their performance limitations, especially in the human body. In this study, a new routing protocol is proposed for WBAN using the FCM clustering technique and where the residual energy function is used for a dynamic choice of CH at each turn. An evaluation of the performance of this WBAN routing protocol for medical applications is presented. The protocol is evaluated in terms of power consumption, stability, and network lifetime.

**Keywords:** WBAN network, routing protocol, clustering, energy efficiency.

## ملخص

تتكون شبكة منطقة الجسم اللاسلكية (WBAN) من عقد مختلفة غير متجانسة تقع على السطح أو داخل جسم الإنسان لخدمة التطبيقات المختلفة. WBAN هو حل واعد في قطاع الرعاية الصحية. بروتوكولات التوجيه لها تأثير واضح على كفاءة شبكة WBAN. ومع ذلك ، فإن بروتوكولات توجيه شبكة أجهزة الاستشعار اللاسلكية الحالية لا تنطبق على WBAN بسبب قيود أدائها ، خاصة في جسم الإنسان. في هذه الدراسة ، تم اقتراح بروتوكول توجيه جديد لـ WBAN باستخدام تقنية تجميع FCM وحيث يتم استخدام وظيفة الطاقة المتبقية لاختيار ديناميكي لـ CH عند كل منعطف. يتم تقديم تقييم لأداء بروتوكول توجيه WBAN هذا للتطبيقات الطبية. يتم تقييم البروتوكول من حيث استهلاك الطاقة ، والاستقرار ، وعمر الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** شبكة WBAN ، بروتوكول التوجيه ، التجميع ، كفاءة الطاقة.

# Table des matières

Remerciements.....	II
Dédicace .....	III
Résumé.....	V
Abstract .....	V
ملخص.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures .....	XI
Liste des tableaux .....	XIII
Liste des abréviations .....	XIV
Introduction générale .....	2
CHAPITRE I : Théorie des réseaux de capteurs sans fil .....	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Généralités sur les capteurs .....	5
I.2.1 Définition d’ un nœud capteur .....	5
I.2.2 Architecture d’ un nœud capteur .....	6
I.2.2.1 Architecture matérielle.....	6
I.2.2.2 Architecture logicielle .....	7
I.2.3 Types de capteurs .....	8
I.2.4 Caractéristiques des capteurs [5].....	8
I.3 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) .....	9
I.3.1 Architecture des réseaux de capteurs sans fil.....	9
I.3.1.1 Les RCSFs plats .....	10

I.3.1.2	Les RCSFs hiérarchiques .....	10
I.3.2	Caractéristiques des RCSFs .....	11
I.3.3	Domaines d' applications des RCSFs .....	13
I.3.4	Classification des applications RCSF .....	14
I.3.4.1	Applications orientées temps .....	14
I.3.4.2	Applications orientées événements .....	14
I.3.4.3	Applications orientées requêtes .....	14
I.3.4.4	Applications hybrides .....	15
I.4	Réseau de capteurs corporels sans fil (WBAN) .....	15
I.4.1	Définition.....	15
I.4.2	Différence entre WBAN et WSN .....	16
I.4.3	Le standard IEEE 802.15.6 .....	18
I.4.4	Architecture de communication des WBAN .....	18
I.4.5	Les applications WBAN.....	19
I.4.6	Topologies des réseaux WBAN .....	20
I.4.7	Les composants d'un système WBAN .....	21
I.4.8	Catégories des nœuds capteur WBAN .....	22
I.4.8.1	Classement selon la fonctionnalité.....	22
I.4.8.2	Classement selon l' implémentation .....	24
I.4.8.3	Classement selon le rôle.....	24
I.4.9	Défis des réseaux WBAN .....	24
I.5	Conclusion .....	25
Chapitre 2 : Méthodes de routage et clustering .....		27
II.1	Introduction.....	28
II.2	Protocoles de routage .....	28
II.2.1	Définition du routage.....	28

<b>II.2.2</b>	<b>Classification des protocoles de routage pour RCSF .....</b>	<b>29</b>
<b>II.2.2.1</b>	<b>Routage plat .....</b>	<b>30</b>
<b>II.2.2.2</b>	<b>Routage basé sur la localisation .....</b>	<b>30</b>
<b>II.2.2.2</b>	<b>Routage hiérarchique.....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.3</b>	<b>Classification des protocoles de routage pour WBAN .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.3.1</b>	<b>Routage basé sur la posture (posture-based).....</b>	<b>32</b>
<b>II.2.3.2</b>	<b>Routage basé sur la température (temperature-based).....</b>	<b>33</b>
<b>II.2.3.3</b>	<b>Routage inter-couche (cross-layer routing) .....</b>	<b>33</b>
<b>II.2.3.4</b>	<b>Routage basé sur le clustering (cluster-based) .....</b>	<b>34</b>
<b>II.2.3.5</b>	<b>Routage basé sur la QoS (QoS -based).....</b>	<b>34</b>
<b>II.3</b>	<b>Clustering.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3.1</b>	<b>Définition d' un cluster.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Définition du clustering.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3.3</b>	<b>Etapes du clustering .....</b>	<b>36</b>
<b>II.3.4</b>	<b>Méthodes de clustering de base .....</b>	<b>37</b>
<b>II.3.5</b>	<b>Clustering hiérarchiques.....</b>	<b>37</b>
<b>II.3.5.1</b>	<b>L'approche ascendante ou agglomérative (CHA) :.....</b>	<b>38</b>
<b>II.3.5.2</b>	<b>L'approche descendante ou divisive (CHD) : .....</b>	<b>39</b>
<b>II.3.5.3</b>	<b>Caractéristiques des méthodes hiérarchiques : .....</b>	<b>40</b>
<b>II.3.5.4</b>	<b>Avantages et inconvénients des méthodes hiérarchiques :.....</b>	<b>40</b>
<b>II.3.6</b>	<b>Clustering par partitionnement .....</b>	<b>41</b>
<b>II.3.6.1</b>	<b>Principe des algorithmes de clustering par partitionnement.....</b>	<b>41</b>
<b>II.3.6.2</b>	<b>Algorithme K-Means.....</b>	<b>42</b>
<b>II.3.6.3</b>	<b>Algorithme Fuzzy C-Means.....</b>	<b>43</b>
<b>II.3.6.4</b>	<b>ISODATA.....</b>	<b>44</b>
<b>II.3.6.5</b>	<b>Fast Global K-Means .....</b>	<b>46</b>



II.3.6.6	K-Means++ .....	46
II.3.6.7	Avantages et inconvénients des méthodes par partitionnements ..	47
II.3.7	Clustering à base de densité.....	47
II.3.7.1	DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise).....	48
II.3.7.2	Avantages et inconvénients de DBSCAN .....	49
II.3.8	Clustering basé sur un modèle .....	49
II.3.8.1	L' algorithme de maximisation des attentes (EM) .....	50
II.3.8.2	L' algorithme Self Organizing Maps (SOM) .....	51
II.3.8.3	Avantages et inconvénients du clustering basé sur un modèle ....	54
II.4	Pourquoi formé des clusters ? .....	54
II.5	Conclusion.....	55
Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultat .....		57
III.1	Introduction .....	58
III.2	Travaux récents .....	59
III.3	Contributions et protocoles proposés .....	60
III.4	Outils de simulation.....	60
III.5	Algorithme FCM (Fuzzy C-Means).....	61
III.6	Modèle WBAN utilisé.....	62
III.6.1	Déploiement des nœuds .....	62
III.6.2	Scénario de routage entre nœuds .....	63
III.6.3	Modèle énergétique .....	64
III.7	Implémentation de protocoles de routage .....	66
III.7.1	Routage CBFCM.....	68
III.7.2	Routage improved CBFCM .....	71
III.7.3	Transmission par routage direct .....	74

<b>III.8</b>	<b>Comparaison et évaluation du protocole proposé.....</b>	<b>76</b>
<b>III.8.1</b>	<b>Energie résiduelle.....</b>	<b>76</b>
<b>III.8.2</b>	<b>Durée de vie du réseau.....</b>	<b>77</b>
<b>III.8.3</b>	<b>Stabilité du réseau.....</b>	<b>78</b>
<b>III.9</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>79</b>
	<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>81</b>
	<b>Références.....</b>	<b>84</b>

# Liste des figures

Chapitre I : Théorie et généralité sur les réseaux capteurs sans fil ‘ ’ RCSF’ ’

[Figure 1.1: Exemple d'un capteur](#)

[Figure 1.2 : L' architecture matérielle d' un capteur](#)

[Figure 1.3: Utilisation des différents OS](#)

[Figure 1.4 Evolution des capteurs](#)

[Figure 1.5 RCSF Plat utilisant un mode de transmission multi-saut](#)

[Figure 1.6 Architecture hiérarchique d' un RCSF](#)

[Figure 1.7: Quelques domaines d'applications des RCSF](#)

[Figure 1.8 Exemple d' un réseau BAN appliqué au secteur médical](#)

[Figure 1-9 Niveaux hiérarchiques intra et extra-BAN](#)

[Figure 1.10 Diverse applications des WBANs](#)

[Figure 1.11 Topologies dans les réseaux WBAN](#)

Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

[Figure 2.1 Classification des protocoles de routage pour RCSF](#)

[Figure 2.2 Classification des protocoles de routage pour WBANs](#)

[Figure 2.3 Principe du Clustering](#)

[Figure 2.4 Exemple d'un dendrogramme](#)

[Figure 2.5 Algorithme k-Means.](#)

Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultat

[Figure 3.1 Localisation des nœuds](#)

[Figure 3.2 Déploiement des nœuds et centroïdes des clusters](#)

[Figure 3.3 Transmission par CBFCM \(nœuds 4 et 12 premiers CH\)](#)

[Figure 3.4 Energie résiduelle consommée par CBFCM](#)

[Figure 3.5 nombre de nœuds vivants avec le protocole CBFCM](#)

[Figure 3.6 Transmission par Improved CBFCM \(nœuds 3 et 10 premiers CH\)](#)

[Figure 3.7 Energie résiduelle consommée par improved CBFCM](#)

[Figure 3.8 Nombre de nœuds vivants avec le protocole improved CBFCM](#)

[Figure 3.9 Transmission directe au sink](#)

[Figure 3.10 Energie résiduelle consommée en transmission directe](#)

[Figure 3.11 Nombre de nœuds vivants en transmission directe](#)

[Figure 3.12 Comparaison des énergies résiduelles consommées par les 3 méthodes](#)

[Figure 3.13 Comparaison du nombre de nœuds vivants pour les 3 méthodes](#)

[Figure 3.14 Round du premier et dernier nœud qui meurt pour chacune des 3 méthodes](#)

# Liste des tableaux

[Tableau I.1 Différences entre les réseaux WBAN et les réseaux WSN](#)

[Tableau I.2 Exemples de capteurs portables et implantables](#)

[Tableau 3.1 positions des nœuds selon les axes X et Y](#)

[Tableau 3.2 Paramètres de simulation](#)

# Liste des abréviations

RCSF	Réseaux de Capteur Sans Fils
BAN	Body Area Network
ADC	Analog to Digital Converter
WSN	Wireless Sensor Network
SN	Sensor Node
UCT	Unité Centrale de Traitement
CH	Cluster Head
ECG	Electrocardiogramme
EMG	Electromyographie
EEG	Electrocéphalogramme
QoS	Qualité de service
SPIN	Sensor Protocol for Information via Negotiation
DD	Directed Diffusion
MECN	Minimum Energy Communication Network
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
RSSI	Received Signal Strength Indication
GPS	Global Positioning System
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems
TARA	Thermal Aware Routing
PCLRP	Priority Based Gross Layer Retransmit Strategy
CHA	Clustering Hierarchique Ascendant
CHD	Clustering Hierarchique Décendante
DBSCAN	Density Based Spacial clustering of Application
SOM	Self Organizing Maps
GNCH	Gateway Node Based Clustering Hierarchy
E-HARP	Energy Efficient Harvested Aware Clustering and copirative Routing Protocole



# **INTRODUCTION GENERALE**



## Introduction générale

Le progrès dans le domaine de l'électronique a remodelé la technologie des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS), ce qui a rendu les capteurs plus puissants et intelligents. Les capteurs MEMS sont des dispositifs de petite taille capables de détecter l'environnement, de collecter, de traiter et de transmettre des données. Pour tirer profit du développement dans la communication sans fil, les capteurs sont devenus capables de communiquer entre eux de manière indépendante en utilisant cette technologie, donnant naissance au Réseaux de Capteurs Sans Fil sans cesse en développement dans une large gamme d' application tel que les Réseaux de Capteurs Corporaux sans Fil.

Le WBAN est un type spécial de réseau utilisé pour surveiller les paramètres liés à la santé du corps humain sans perturber sa routine quotidienne afin de répondre aux besoins des soins de santé et des systèmes médicaux. La composition du WBAN comprend des nœuds capteurs (Sensor Node : SN) de petite taille déployés sur différentes parties du corps humain qui observent différents paramètres physiologiques tels que la pression artérielle, la fréquence cardiaque, le taux de glucose, etc. Ces SN déployés enregistrent et traitent les données détectées d'un corps humain, puis les transmettent vers une station de base ou un nœud puits (Sink). Ces données enregistrées sont dirigées vers un réseau externe ou stockées sur un Cloud à partir duquel différents professionnels de la santé situés à distance peuvent y accéder pour que des mesures nécessaires puissent être prises.

Le principal inconvénient de ces SN de petite taille est leurs ressources limitées telles que la capacité de la batterie, qui se décharge rapidement en raison des différentes opérations effectuées, principalement celle de transmission. L' épuisement de l'énergie entraîne la mort prématurée des SN, ce qui affecte gravement la durée de vie du réseau. Le plus grand défi de conception auquel sont confrontés les WBAN est de fournir une livraison de données fiable et d'améliorer la durée de vie du réseau sous la contrainte d'une alimentation électrique limitée et imposée. Par conséquent, les protocoles de routage pour les WBAN doivent être conçus de manière à prendre en compte les limitations énergétiques des SN afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Les protocoles de routage basés sur le mécanisme de clustering sont appropriés dans les applications liées aux WBAN. Dans l' approche de clustering, le réseau est partitionné en différents clusters. Le Cluster Head (CH) rassemble les données reçues en un seul paquet puis

le transmet au Sink. L'approche de clustering, combinée à un choix judicieux du CH, garantit de cette manière une utilisation minimale de l'énergie.

L'objectif de ce travail est de présenter un algorithme de routage basé sur le clustering pour le WBAN avec une approche de sélection de CH fondée sur l'énergie résiduelle consommée dans le réseau.

Pour cela ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les réseaux de capteurs sans fils d'une manière générale, en définissant le nœud capteur et son architecture, les différentes architectures des RCSF, ainsi que leurs caractéristiques et domaines d'applications. Nous allons par la suite exposer les réseaux WBANs en particulier, le standard IEEE 802.15.6 pour la normalisation du WBAN ainsi que l'architecture de communication adoptée dans le WBAN et leurs domaines d'applications. Enfin, nous présentons les principaux défis des réseaux WBAN.

Le deuxième chapitre permet de présenter en premier lieu une étude sur les méthodes de routage qui existent dans la littérature avec une classification de ces protocoles dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite une autre classification est présentée spécifique aux réseaux WBAN où certaines contraintes sont prises en considération. Nous terminons avec une étude des principaux algorithmes de clustering et l'avantage de leur utilisation dans les RCSF et WBAN.

Le troisième chapitre est consacré à l'implémentation du protocole de routage adopté dans notre contribution. Nous allons tout d'abord présenter certains travaux récemment effectués sur le routage et clustering dans les WBAN, pour justifier notre choix du protocole adopté. La topologie du réseau WBAN ainsi que le modèle énergétique utilisé sont détaillés dans la suite de ce chapitre. Puis nous présenterons les performances du routage proposé en le comparant à d'autres protocoles existants pour valider notre étude.

# **CHAPITRE I :**

# **Théorie des réseaux**

# **de capteurs**

# **sans fil**

## I.1 Introduction

La croissance sans limites dans la technologie actuelle implique un spectaculaire essor des télécommunications sans fil grand public dans divers dispositifs de communication et dans différents domaines, tels que la médecine, la défense ou l'aéronautique. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée.

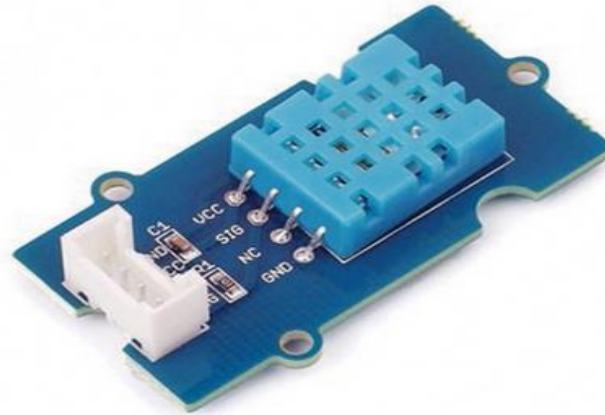
Les réseaux de capteurs sans fil RCSF appliqués au secteur de la santé permettent de relever de nombreux défis tels que l'accroissement incessant de la demande d'assistance médicale (avec l'accroissement des populations), l'insuffisance des infrastructures de proximité (hôpital, centre médical) etc. La technologie WBAN vient en aide à la médecine pour le suivi des personnes âgées, des enfants, mais surtout des personnes ayant une maladie chronique.

L'objectif de ce chapitre est de donner d'abord une vue générale sur les réseaux de capteurs sans fils, en commençant par définir ce que c'est qu'un nœud capteur, nous continuons avec les architectures plates et hiérarchique des RCSF, ainsi que leurs caractéristiques et domaines d'applications. Par la suite, nous mettons l'accent sur les réseaux corporels sans fil WBAN en présentant leurs domaines d'applications médicales et non médicales, topologies utilisées et catégories des nœuds capteurs, se basant sur le standard établi pour normaliser ce type de communication. Nous clôturons ce chapitre par les principaux défis des réseaux WBAN.

## I.2 Généralités sur les capteurs

### I.2.1 Définition d'un nœud capteur

Un capteur sans fil (*sensor*) est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale tel que : température, lumière, pression, etc. (figure I.1), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Chaque capteur assure les trois principales fonctions de base qui sont : l'acquisition de données, le traitement de ces données et leurs transmissions aux stations de bases [1].



**Figure 1.1** Exemple d'un capteur de température

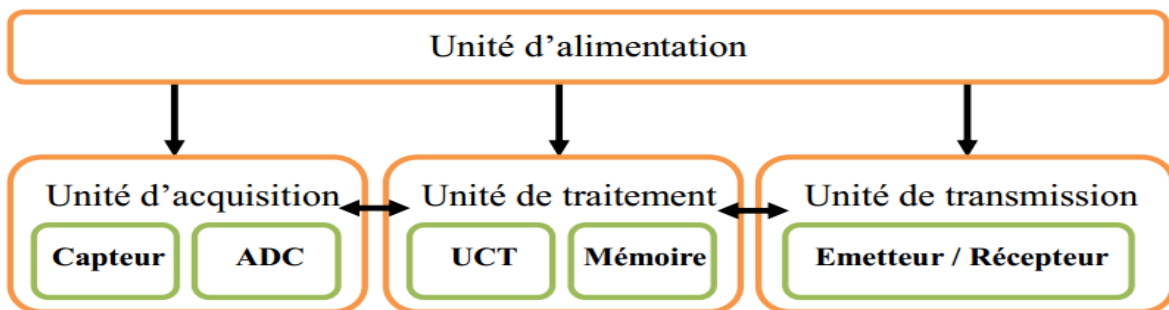
Un nœud capteur (*Sensor Node*) est un petit appareil autonome composé de plusieurs capteurs correspondant chacun à une tâche particulière d'acquisition, de traitement, ou de transmission de données possédant une source énergétique limitée.

## I.2.2 Architecture d' un nœud capteur

Afin d' assurer les fonctions de base, un nœud capteur sans fil est basé sur des architectures : matérielle et logicielle détaillées dont ce qui suit.

### I.2.2.1 Architecture matérielle

Sur la figure I.2 sont représentées les différentes unités d' un nœud capteur :



**Figure 1.2** Architecture matérielle d' un nœud capteur

**a. Unité d'acquisition :** Généralement composée de deux sous-unités (les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs). Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques, les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques [2].

**b. Unité de traitement :** Composée de deux interfaces, une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au capteur de collaborer avec les autres capteurs pour réaliser les tâches d' acquisition ; grâce à son unité centrale de traitement (UCT) qui est dotée d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs ; et stocke les données collectées dans la mémoire interne [2].

**c. Unité de communication : (Radio, Antenne)** elle est responsable de toutes les communications via un support de communication radio qui relie le nœud au réseau [2]. Elle a pour fonction de transmettre et recevoir l'information. Elle est équipée d'un couple émetteur/récepteur pour communiquer au sein du réseau. Il existe cependant d'autres possibilités de transmission (optique, infrarouge, etc...).

**d. Unité d'alimentation : (Batterie ou pile alimentant le capteur)** généralement la batterie. Elle est responsable de l' alimentation de tous les composants du capteur [2]. La capacité d' énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs.

### *1.2.2.2 Architecture logicielle*

La contrainte énergétique des capteurs exige l' utilisation de systèmes d' exploitation (OS) légers tels que TinyOS ou Contiki qui doivent être intégrés au niveau des UCTs. Cependant, TinyOS reste toujours le plus utilisé et le plus populaire dans le domaine des RCSF (figure I.3). Il est libre et utilisé par une large communauté de scientifiques dans des Simulations pour le développement et le test des algorithmes et protocoles réseau [2].

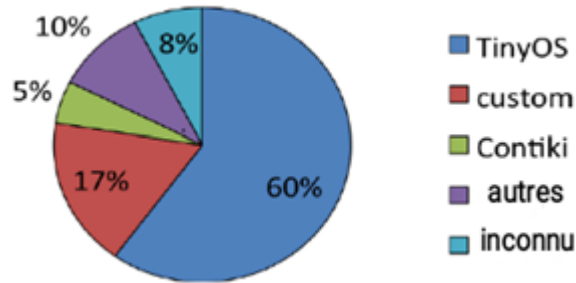


Figure 1.3 Utilisation des différents OS

## I.2.3 Types de capteurs

Il existe actuellement un grand nombre de capteurs, avec des fonctionnalités diverses et variées. Tous ces différents capteurs ne pourraient être décrits ici, cependant une liste exhaustive peut être trouvée sur le site *The Sensor Network Museum* [4]. La plupart des capteurs dépendent de l'application pour lesquels ils ont été conçus (capteur aquatique, sous-terrain, etc...). Il est plus intéressant de décrire les capteurs les plus utilisés et leur évolution au cours du temps. En l' occurrence, la figure 1.4 illustre l'évolution des capteurs au cours de ces 25 dernières années.



Figure 1.4 Evolution des capteurs

## I.2.4 Caractéristiques des capteurs [5]

Les capteurs doivent satisfaire les caractéristiques suivantes :

- *L' étendue de la mesure* : c' est la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure de la grandeur mesurable par un capteur.

- **La linéarité** : elle caractérise l' aptitude d' un capteur à fournir une grandeur de sortie dont la valeur est proportionnelle à celle mesurée.
- **La sensibilité** : elle représente la variation du signal de sortie par rapport au signal d' entrée.
- **La précision** : il s' agit de l' aptitude d' un capteur à donner des mesures proches de la réalité.
- **La finesse** : elle permet d' estimer l' influence que peut avoir un capteur sur la grandeur à mesurer.
- **La rapidité** : représente le temps de réponse d' un capteur, qui est en rapport avec la bande passante utilisée.
- **La répétition** : représente la capacité d' un capteur à présenter la même valeur dans des conditions identiques.
- **L' incertitude** : représente l' estimateur de la dispersion ou l' écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte. Chaque mesure doit être accompagnée de cet écart, pour considérer le résultat comme complet.

## I.3 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

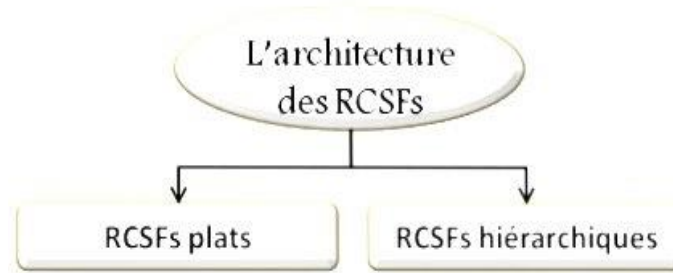
### I.3.1 Architecture des réseaux de capteurs sans fil

Le réseau de capteur sans fil ou RCSF (*Wireless Sensor Network* 'WSN') [6] est un type spécial de réseaux ad-hoc. Il se compose généralement d' un grand nombre de nœuds, qui communiquent entre eux via des liens radio pour le partage de l' information et le traitement coopératif. Ces nœuds sont déployés aléatoirement dans une zone d' intérêt pour superviser ou surveiller divers phénomènes.

Après le déploiement initial, les nœuds peuvent s' auto-organiser en une infrastructure réseau appropriée. Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via un routage multi-sauts à un nœud considéré comme "point de collecte" ayant suffisamment de ressources, appelé nœud puits (*sink node*) ou vers une station de base. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite.

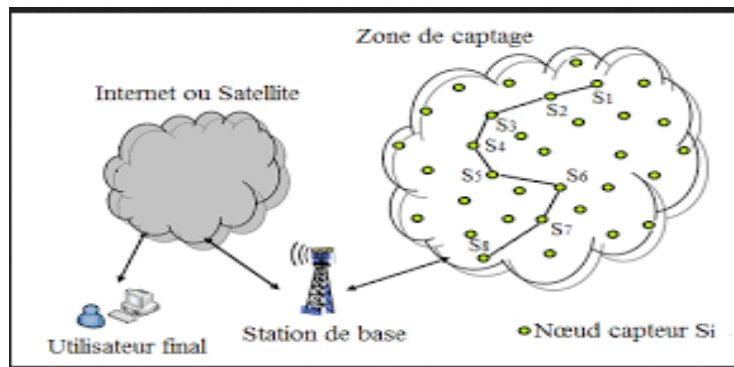


Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être classés selon leur topologie en deux grandes classes : les réseaux dits plats et ceux dits hiérarchiques.



### *1.3.1.1 Les RCSFs plats*

Dans une architecture plate, les capteurs peuvent communiquer avec la station de base selon deux modes: mono-saut ou multi-sauts. Dans le mode de transmission mono-saut tous les capteurs transmettent directement leurs données collectées à la station de base en utilisant une forte puissance de transmission ce qui conduit à un épuisement rapide de leurs batteries. Dans le mode multi-sauts tous les capteurs coopèrent entre eux via un routage multi-sauts dans lequel chaque capteur a le même rôle (figure I.5). Quand un capteur veut communiquer avec une station de base se trouvant hors de sa portée de transmission, il impliquera d'autres nœuds intermédiaires comme relais [12].



**Figure 1.5** RCSF Plat utilisant un mode de transmission multi-saut

### *1.3.1.2 Les RCSFs hiérarchiques*

Une architecture hiérarchique a été proposée pour réduire le coût et la complexité de la plus part des nœuds capteurs en introduisant un ensemble de nœuds capteurs plus coûteux et plus

puissant, ceci en créant une infrastructure qui décharge la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau [13].

Dans l'architecture hiérarchique les nœuds sont organisés en classes ou encore *clusters*. Deux types de responsabilités peuvent être notés : les nœuds simples et ceux chef de classe ou *cluster head (CH)*. Seuls les chefs de clusters ont la possibilité d'interagir avec la station de base, tandis que les nœuds membres d'un cluster doivent nécessairement passer par le cluster head (*CH*) pour atteindre la station de base (Figure I.6).

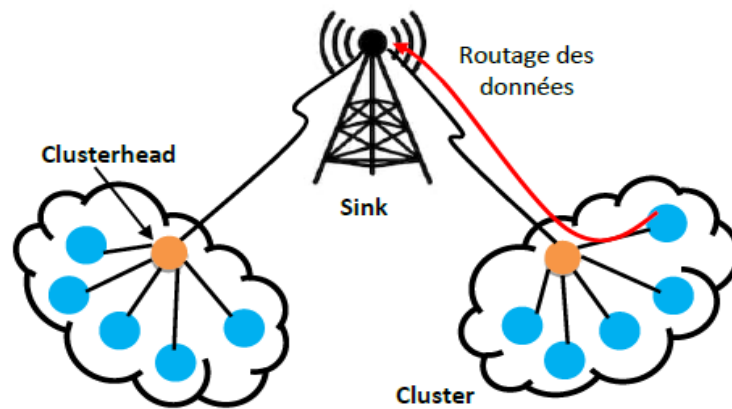


Figure 1.6 Architecture hiérarchique d'un RCSF

## I.3.2 Caractéristiques des RCSFs

Il existe plusieurs caractéristiques qui distinguent les RCSFs des autres réseaux sans fil, les plus importantes sont [7] [8] :

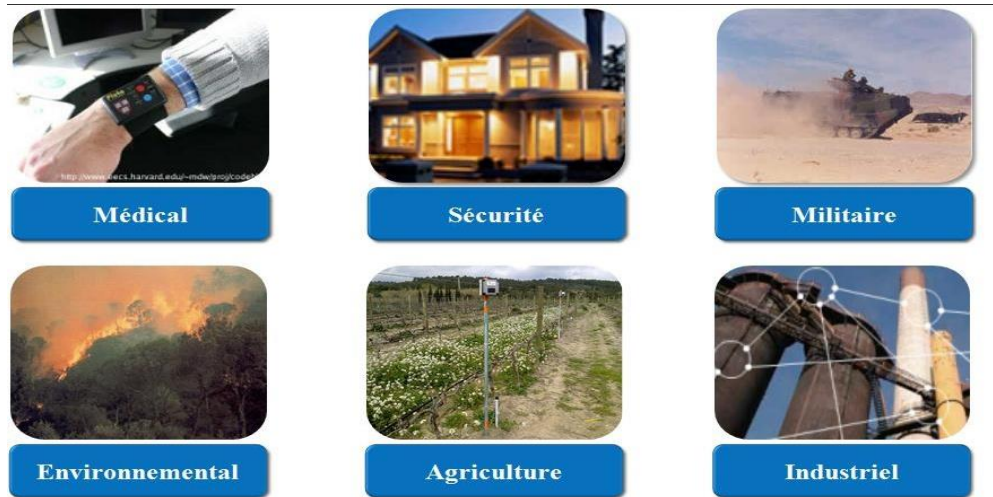
- **Absence d'infrastructure** : Les réseaux Ad-hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.
- **Une densité importante des nœuds**: Les RCSFs sont caractérisés par leur forte densité. Cette densité peut atteindre, selon le type d'application, 20 nœuds/m<sup>3</sup> [9] surtout lorsqu'il s'agit de capteurs associés à des petits objets connectés.

- **Interférences** : Les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.
- **Topologie dynamique** : Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.
- **Sécurité physique limitée** : Les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- **Bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un support de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée. Pour minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit « quelques dizaines de Kb/s »
- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul** : La caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie (batterie). Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud. Ainsi, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont limitées dans un capteur.
- **Une collaboration entre les nœuds** : Les contraintes strictes de consommation d'énergie mènent les nœuds capteurs à détecter et traiter les données d'une manière coopérative afin d'éviter le traitement redondant d'une même donnée observée, et qui aura un impact négatif sur la perte d'énergie.
- **Durée de vie du réseau** : La durée de vie est une métrique d'évaluation de performance très importante dans les RCSF. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
- **La tolérance aux pannes** : Dans le cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs capteurs à cause d'un manque d'énergie, d'un problème physique ou d'une interférence, les fonctionnalités du réseau doivent être maintenues sans interruptions [9].

## I.3.3 Domaines d' applications des RCSFs

Le domaine d' applications des RCSF est très varié. Ces réseaux sont présents (figure I.7) dans le domaine militaire, sécurité civile, médical, transport, environnemental, commerciales,...etc.

- **Applications militaires:** Les RCSF permettent la détection des mouvements ennemis sur un champ de bataille, de tracer leurs mouvements. Ou alors la détection de mines, d' agents chimiques, biologiques, radiations ...etc.
- **Applications médicales:** Dans le domaine de la santé, les capteurs sur le corps humain permettent le suivi des patients à long terme, le suivi des personnes âgées ainsi que par exemple la localisation des docteurs et des patients à l'hôpital.
- **Applications environnementales:** RCSF est largement utilisé dans se domaine par exemple : la détection des incendies, la surveillance des catastrophes naturelles, la détection des pollutions et le suivi des écosystèmes.
- **Applications agricoles:** des RCSF sont utilisé dans la terre afin de faire des mesures sur certains paramètres tels que le taux d' humidité, la température, etc. Pour déterminer les secteurs les plus secs et les irriguer en priorité.
- **Applications de transport:** les RCSFs sont utilisés dans la surveillance des réseaux ferroviaires ou routiers pour la gestion de trafic ainsi que pour la prévention des accidents, aussi pour la détection de déformation de structure.
- **Applications de Sécurité :** tel que la détection et surveillance d'incendies de forêts, d'avalanches, d'ouragans ou de risque de défaillance d'équipement de grande envergure.
- **Applications commerciales :** Dans ce secteur on peut énumérer plusieurs applications comme : la surveillance de l'état du matériel, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, etc.



**Figure 1.7** Quelques domaines d'applications des RCSF

## I.3.4 Classification des applications RCSF

Les applications peuvent être classées selon 4 catégories qui sont :

### *I.3.4.1 Applications orientées temps*

Se sont les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis, période d'acquisition. Cette période d'acquisition peut être plus au moins longue selon l'application (de quelques secondes jusqu'à quelques heures voir des jours). Ainsi, la quantité de données échangée dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement [10].

### *I.3.4.2 Applications orientées événements*

Dans ce type d'applications, les capteurs envoient les données à la station de base seulement si un événement spécial se produit. Nous pouvons citer l'exemple de surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil [11]. Ce type d'application est retrouvé dans différents domaines tels que la surveillance médicale, le contrôle d'édifice, la surveillance militaire, etc.

### *I.3.4.3 Applications orientées requêtes*

Le capteur dans ce cas envoie l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'applications est destinée aux applications adaptées à

l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures bien particulières [10]. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l' emplacement des capteurs sont nécessaires

### ***1.3.4.4 Applications hybrides***

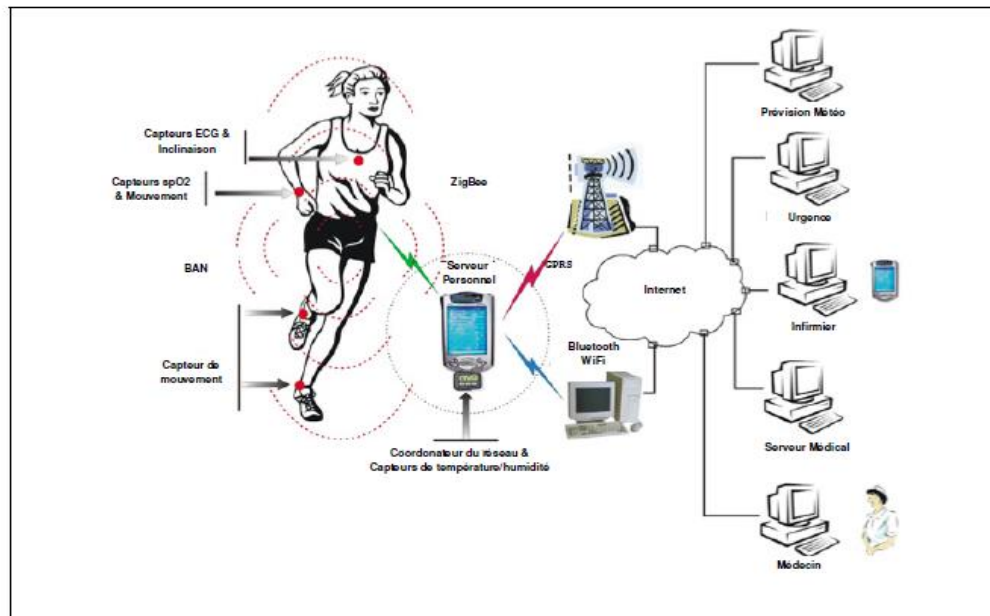
Ce type d'applications met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance et un réseau de collecte de données par événements [10].

## **I.4 Réseau de capteurs corporels sans fil (WBAN)**

### **I.4.1 Définition**

Les réseaux de capteurs corporels sans fil dits WBSN (*Wireless body Sensor Networks*) communément appelé (*WBAN : Wireless Body Area Network*) font partie des applications orientées événements des réseaux RCSF, composé d' un ensemble de biocapteurs communicants placés sur le corps d' un être vivant. Ces biocapteurs intelligents peuvent être placés à l' intérieur (*in body*) ou sur la surface (*on body*) du corps humain qui ne nuisent pas à ses activités normales.

Les WBANs permettent une surveillance physiologique des patients et sont chargés d' acheminer les données détectées, informations physiques ou vitales, issues des biocapteurs vers un serveur médical ou non médical via une station de base (internet) pour un traitement ultérieur [15,16]. La figure 1.8 illustre un exemple de déploiement d' un réseau WBAN.



**Figure 1.8** Exemple d' un réseau BAN appliqué au secteur médical

## I.4.2 Différence entre WBAN et WSN

Les défis auxquels les WBANs sont confrontés sont souvent différents par rapport à ceux des WSN traditionnels. Nous savons que le corps humain offre un environnement relativement petit et qu' il réagit en fonction de l'environnement interne aussi bien qu'à l'environnement externe [17].

C'est une évidence que de dire que la surveillance du corps humain nécessite une fiabilité et précision élevées car de fausses lectures peuvent conduire à de faux diagnostic ou de mauvaises décisions sur des questions critiques.

Les capteurs doivent également être en mesure de se déplacer selon les différentes postures et mouvements humains ce qui n' est pas le cas pour les capteurs dans un WSN traditionnel.

La gestion de la consommation énergétique d' un WBAN est d' autant plus difficile que la palette d' applications possibles est large, nécessitant chacune des besoins différents en termes de débits, de fiabilité et de sécurité, et ce dans des environnements variables.

D' autres différences sont résumées dans le tableau I.1 selon les défis et les problèmes de chacun des deux réseaux.



Défis / problèmes	WBAN	WSN
Surveillance	Paramètres physiologiques du corps humain	Surveillance de l'environnement
Échelle	De quelques centimètres à quelques mètres	De quelques mètres en kilomètres
Canal	Canal médical, ISM (industriel, scientifique et médical), surface corporelle	ISM
Nombre de nœuds	Peu, limité dans l'espace	De nombreux nœuds sont nécessaires pour qu'une large zone soit couverte
Précision du résultat	Grâce à la précision et à la robustesse des nœuds	Grâce à la redondance des nœuds
Tâche du nœud	Plusieurs	Tâche dédiée
Taille du nœud	De préférence petit	De préférence petit, mais pas important
Topologie du réseau	Plus variable en raison des mouvements du corps humain	Très probablement fixe ou statique
Taux de données	Non homogène	Homogène
Remplacement des nœuds	Remplacement des nœuds implantés difficile	Effectué facilement, nœuds pouvant être jetables
Durée de vie du nœud	Jours / mois	Mois / années
Source de courant	Inaccessible et difficile à remplacer dans un environnement implantable	Accessible et susceptible d'être remplacé plus facilement et fréquemment
Demande de puissance	Inférieur	Grand
Source de récupération d'énergie	Mouvement (vibration), chaleur thermique	Énergie éolienne et énergie solaire
Biocompatibilité	Très important	Pas important
Niveau de sécurité	Plus haut, pour protéger les informations des patients	Inférieur
Impact de la perte de données	Plus significatif	Compensé par des nœuds redondants
Technologie sans fil	Technologie basse consommation requise (Le standard IEEE 802.15.6)	Bluetooth, ZigBee, GPRS et réseau local sans fil (WLAN)

**Tableau I.1** Différences entre les réseaux WBAN et les réseaux WSN



## I.4.3 Le standard IEEE 802.15.6

Pour la normalisation du WBAN un groupe de travail appelé *IEEE 802.15.6* est établi par l' IEEE 802. La normalisation IEEE 802.15.6 vise à fournir une norme internationale pour des communications radiofréquences dans l' environnement proche du corps humain, faible puissance, courte portée, avec une grande fiabilité et pour une gamme de débits de données variés (correspondant aux applications médicales et non médicales) allant de quelques dizaines de kbps jusqu'à plusieurs Mbps.

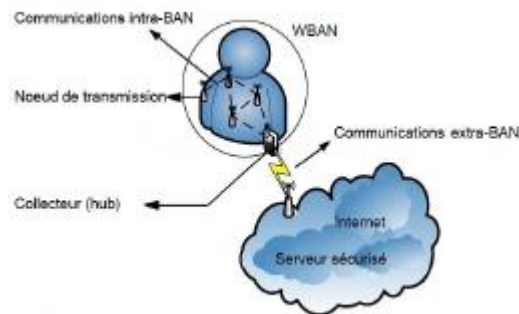
Le standard IEEE 802.15.6 considère comme technologie de base la technologie radiofréquence, et définit l' architecture d' un BAN, et les protocoles de communications associés.

## I.4.4 Architecture de communication des WBAN

Les WBANs ont pour objectif d' organiser la collecte des données sur le corps humain et de permettre leur traitement. Pour ce faire, un WBAN est décomposé en deux niveaux hiérarchiques : l' intra-BAN et l' extra-BAN, comme montrés sur la figure I-9.

Les communications intra-BAN ont lieu entre les nœuds capteurs, et le nœud puits (SN). Ce premier niveau, permet de collecter les données du porteur, et de préparer leur transmission vers l' extérieur.

Le deuxième niveau porte sur les transmissions des données collectées par le nœud puits vers un réseau généralement plus étendu, serveur sécurisé ou autre, selon l' application visée.



**Figure 1-9** Niveaux hiérarchiques intra et extra-BAN

## I.4.5 Les applications WBAN

Le groupe de travail IEEE 802.15.6 pour la normalisation des WBANs a subdivisé les applications en 2 catégories, à savoir les applications médicales (classe A) et celles non médicales (classe B). Dans ce qui suit, nous présentons quelques unes de ces applications [17].

- **Traitement médical et diagnostic:** il existe plusieurs cas d'utilisation du WBAN dans le diagnostic et le traitement des maladies tels que les maladies cardiovasculaires (MCV), diabète, asthme, maladie de Parkinson, etc.
- **Plan d'entraînement des athlètes professionnels:** Pendant l'entraînement, les joueurs ou les athlètes peuvent être observés pour leur performance afin qu'ils puissent être testés et en se basant sur leurs performances, ils pourraient être sélectionnés.
- **Sécurité publique et prévention des accidents médicaux:** Un grand nombre de personnes décède chaque année en raison d'accidents médicaux, l'installation d'un nœud capteur pour maintenir un journal des accidents médicaux antérieurs peut réduire le nombre de décès.
- **Protection du personnel en uniforme:** Le WBAN peut être utilisé par les pompiers, les policiers ou militaire, pour qu'ils puissent être surveillé dans des environnements dangereux.
- **Surveillance du sommeil:** Le sommeil est un besoin fondamental et important pour les humains. Un sommeil sain est essentiel pour maintenir une bonne santé mentale et physique, d'où l'intérêt de le surveiller afin d'éviter les troubles et décès qui peuvent se produire.

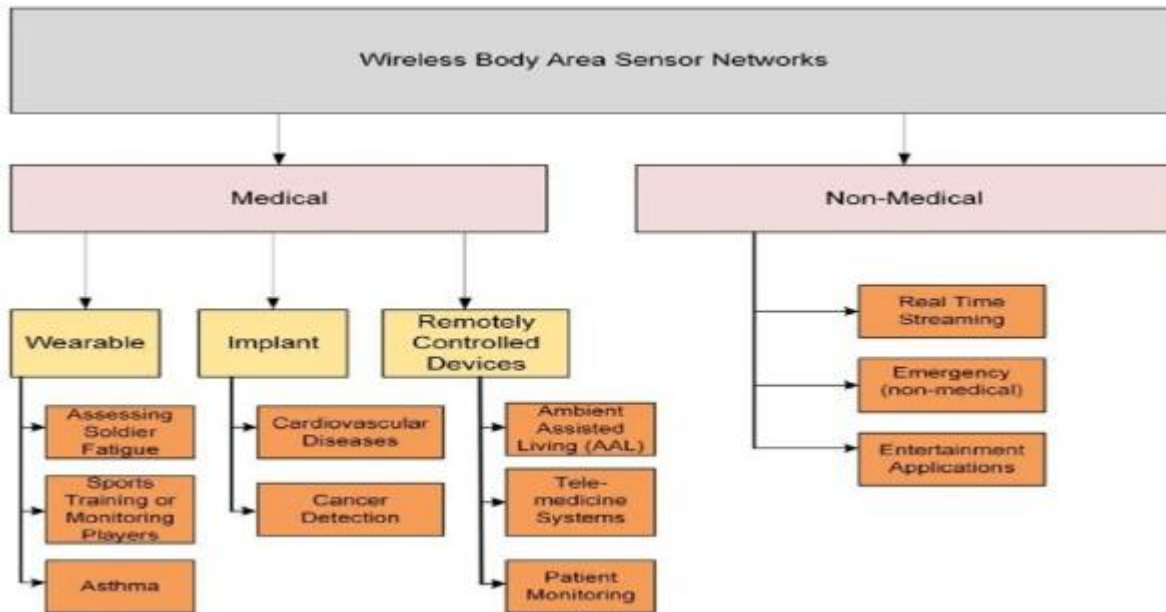


Figure 1.10 Diverse applications des WBANs

### I.4.6 Topologies des réseaux WBAN

Dans les réseaux WBAN nous distinguons les topologies suivantes : point-à-point, étoile, maillée et arbre [18].

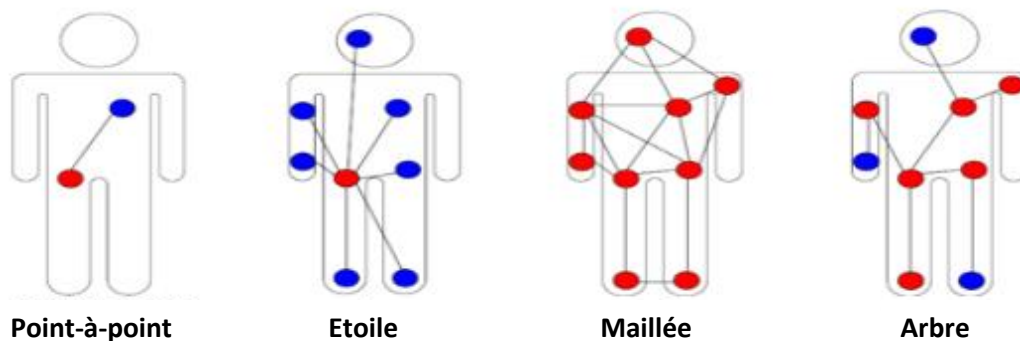


Figure 1.11 Topologies dans les réseaux WBAN

*a. Topologie Point-à-point* : C'est la topologie la plus simple dans les réseaux 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, une faible latence et un débit élevé. Les inconvénients comprennent ses fonctionnalités limitées ainsi que sa faible couverture.

**b. Topologie en Etoile :** Une topologie dans laquelle tous les nœuds sont connectés par l'intermédiaire d'un nœud central. Ces nœuds peuvent seulement envoyer ou recevoir un message par le biais de l'unique nœud central. Il ne leur est pas permis de s'échanger des messages directement entre eux. Cette topologie présente des avantages qui peuvent être résumés par la simplicité, la faible consommation d'énergie des nœuds et la faible latence de communication entre les nœuds et le nœud central. Par contre, son inconvénient majeur est la vulnérabilité du nœud central car tout le réseau est géré par un seul nœud.

**c. Topologie Maillée :** Une topologie avec une connectivité complète entre les nœuds est une topologie maillée. La communication est du type « communication multi-sauts », où tout nœud peut échanger avec n'importe quel autre nœud du réseau s'il est à portée de transmission, sinon il peut utiliser un nœud intermédiaire pour envoyer son message. L'avantage d'utiliser cette topologie est la redondance, la 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.

**d. Topologie en Arbre :** Une topologie en arbre contient un sommet avec une structure de branches au-dessous. Les connexions entre les nœuds sont structurées hiérarchiquement, ce qui signifie que chaque nœud peut être un fils à un nœud de niveau supérieur et un père à un nœud de niveau inférieur. Cette topologie divise le réseau en sous-parties de sorte qu'il devient plus facile à gérer. Elle présente une bonne tolérance aux fautes, une bonne couverture, une bande passante élevée et une faible latence. Toutefois, les nœuds pères peuvent consommer beaucoup d'énergie.

Dans les WBANs, les biocapteurs peuvent être connectés via des schémas de topologie en étoile et maillée ce qui donne lieu à des communications à saut unique et multi sauts.

## **I.4.7 Les composants d'un système WBAN**

Les composants suivants constituent un système WBAN efficace [19]:

- **Capteurs** : Ce sont des biocapteurs leur rôle consiste à recueillir des signaux analogiques qui correspondent à des activités physiologiques de l'homme ou à des actions du corps. Ils sont incorporés en fonction de l'application pour la capture de données du monde réel, doivent consommer le moins d'énergie possible et doivent être équipés des modes *sleep* et *wake up* (modes ' veille' et ' réveil' ) pour maintenir un matériel efficace en fonctionnement.
- **Communication de données**: la communication sans fil est la principale source de transmission, mais doit être opérationnelle dans les bandes de fréquences qui sont tolérantes aux interférences, sans qu'il y ait une superposition de fréquences pendant le fonctionnement en temps réel.
- **Sécurité**: les protocoles du WBAN doivent être très sécurisés, pour cela les données doivent être transmises via le système WBAN à un endroit éloigné avec un chiffrement efficace.
- **Mécanisme de handover** : il est également souhaitable d' avoir un mécanisme de handover dans le système WBAN en utilisant une passerelle ou un routeur sans avoir de nœud en état de surcharge.
- **Antenne**: une antenne de très petite taille doit être mise en œuvre dans le système WBAN pour fonctionner à haute fréquences.
- **Nœud passerelle**: les composants de la passerelle doivent être conçus pour interagir avec les réseaux sans fil dans les systèmes médicaux avec des algorithmes perfectionnés ayant une technique d' apprentissage automatique et approfondie afin que la capture et retransmission des données soient possibles.
- **Mécanisme de sauvegarde**: tout système WBAN doit être équipé d'un système de sauvegarde (backup) pour déclencher une alarme en cas de faible puissance ou de défaillance d' un nœud.

## I.4.8 Catégories des nœuds capteur WBAN

Les nœuds opérants dans les WBAN sont classés selon leurs fonctionnalités, implémentation et rôles.

### I.4.8.1 Classement selon la fonctionnalité

Sur la base des fonctionnalités, les nœuds du WBAN sont les types suivants [19]:

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

**b. Capteurs:** les applications WBAN vont du médical aux applications non médicales. Selon les situations, divers capteurs sont disponibles, portables ou implantables (tableau I.2) pour transmettre des signaux physiologiques.

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

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

Capteurs portables	Capteurs implantables
Electrocardiogramme (ECG)	Stimulateur cardiaque(Pacemaker)
Capteur de glucose	Les implants cochléaires
Électromyographie (EMG)	Défibrillateurs implantables
Électroencéphalogramme (EEG)	Endoscope à capsule sans fil (pilule électronique)
Température	Pilule électronique pour l'administration de médicaments
Oxymètre de pouls (SpO2)	Stimulateur cérébral profond
Pression artérielle	Implants rétiniens

**Tableau I.2** Exemples de capteurs portables et implantables

Les données physiologiques détectées sont transmises sur le réseau à des débits différents. La glycémie, l' ECG, l' EMG et l' EEG transmettent les données détectées à un débit élevé tandis que le biocapteur visuel transmet à un débit très élevé. Le biocapteur de la pression artérielle transmet à faible intensité; les biocapteurs de température transmettent à très faible débit.

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

### *1.4.8.2 Classement selon l' implémentation*

Sur la base de l' implémentation, les nœuds du WBAN sont classés comme suit [19]:

**a. Nœud implanté:** nœud implanté dans le corps humain soit juste au-dessous de la peau ou du tissu corporel.

**b. Nœud de surface du corps:** nœud principalement installé sur la surface du corps du patient.

**c. Nœud externe:** Nœud qui n' a pas de contact direct avec le corps mais il est placé à une distance de 5 à 10 cm de celui-ci.

### *1.4.8.3 Classement selon le rôle*

Sur la base du rôle, les nœuds du WBAN peuvent être classés comme suit [19]:

**a. Nœud coordinateur:** agit comme une passerelle vers le monde extérieur, vers un autre coordinateur WBAN ou point d' accès.

**b. Nœud terminal:** exécute certaines fonctions prédéfinies dans le WBAN.

**c. Nœud relais:** nœuds intermédiaires entre les nœuds parent et enfants.

## **I.4.9 Défis des réseaux WBAN**

La technologie des réseaux de capteurs médicaux WBAN est émergente ainsi elle fait face à une variété de défis durant la phase d' implémentation et de mise en œuvre. Certains sont cités dans ce qui suit.

- **Trafic hétérogène :** Différents types de capteurs et d'actionneurs sont présents dans le réseau WBAN ce qui lui confère une nature hétérogène. Par conséquent, les différents types

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

- **Efficacité énergétique** : L'un des défis majeurs dans la mise en œuvre du WBAN est l'efficacité énergétique. Comme les capteurs WBAN sont alimentés par une petite batterie, la durée de vie de la batterie est un élément essentiel à prendre en considération.

La mise en œuvre d'un WBAN efficace sur le plan énergétique pourrait être possible soit en améliorant la conception des couches PHY et MAC, soit par un système de sauts efficace (saut unique ou multi sauts) ou alors en ayant un cycle de travail adaptatif.

- **Défis de l' environnement** : Les WBAN subissent des pertes de trajectoire pour de nombreuses raisons, telles que les mouvements posturaux du corps, la mobilité des nœuds, les obstacles environnementaux et l'absorption par les tissus corporels. En fait, il est possible de répondre à bon nombre de ces problèmes en créant des liens à sauts multiples et en installant des capteurs aux points importants.

- **Sécurité, authentification et confidentialité** : Il est indispensable de rendre les communications du WBAN très sûres pour préserver la confidentialité des données, ce qui signifie que les informations transmises à partir du WBAN ne doivent être accessibles qu'aux entités autorisées et confirmer l'authenticité des données entrantes

- **Qualité de service (QoS)** : selon les applications, la qualité de service QoS est différente dans les réseaux WBAN. Pour les patients en état critique, les systèmes de surveillance exigent la transmission instantanée des données, sinon, les retards entraînent des situations catastrophiques. Traditionnellement, la QoS comprend la latence, la puissance de transmission, la fiabilité et la réservation de la bande passante.

## I.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil de manière générale et par la suite les réseaux WBAN en particulier avec les différences entre les deux types de réseaux. Nous avons également décrits quelques applications WBAN, leurs composants, topologies et catégories des nœuds utilisés dans ce domaine.



Sachant que les WBAN ne cessent de s' imposer dans le domaine médical comme une alternative aux soins de santé traditionnelle, il faut qu' ils puissent fonctionner correctement pendant une longue période de temps, tenant compte des défis vu auparavant.

La problématique à laquelle nous nous intéressons est de pouvoir établir un protocole de communication entre les différents nœuds d' un réseau WBAN qui consomme le minimum d' énergie pour une durée de vie de réseau plus longue. Pour cela nous nous sommes intéressés aux techniques de routage et de clustering qui existent et qui sont présentées dans le prochain chapitre.

# **Chapitre 2 :**

## **Méthodes de**

### **routage et clustering**

## II.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont devenus de plus en plus populaires grâce aux grandes avancées dans le domaine de la microélectronique qui ont réduit le coût de fabrication des nœuds capteurs d' une manière considérable. Ces réseaux ont montré leur efficacité dans le suivi et le contrôle à distance de l' environnement physique avec une meilleure précision. Actuellement ils sont exploités dans différents domaines d' applications tels l' observation de l' environnement naturel (pollution, inondation,..etc.) ou encore l' analyse biomédicale et la surveillance médicale (détection de cancer, rétine artificielle, taux de glucose, diabète,..etc.).

Cependant la mise en place d' un tel système pose de nombreux problèmes parmi lesquels le problème du maintien des liaisons à l' intérieur du réseau, la collecte des données ou encore le routage de l' information vers les stations de base et les centres de traitement de l' information.

Notre objectif dans ce chapitre est de faire un état de l' art sur les méthodes de routage et de clustering qui existent dans la littérature. Pour cela, la première partie est consacrée au routage avec une classification de ces protocoles dans les réseaux de capteurs sans fil puis particulièrement dans les réseaux WBANs, où certaines contraintes sont prises en considération. La deuxième partie traite la notion de clustering, méthode utilisée pour organiser les nœuds du réseau en clusters, ainsi que les principaux algorithmes de clustering avec leurs avantages et inconvénients respectifs.

## II.2 Protocoles de routage

### II.2.1 Définition du routage

Le routage est un processus qui consiste à trouver le meilleur chemin pour envoyer un message de la source à la destination [20]. L' objectif principal d' un protocole de routage pour un réseau de capteurs sans fil est l' établissement correct et efficace d' itinéraires entre une paire de nœuds afin que des messages puissent être acheminés [39]. Ce protocole doit être efficace en termes d' énergie puisque les nœuds dans ce type de réseaux sont généralement dotés de

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

batteries dont la durée de vie est limitée. Pour cela, il faut bien sûr être capable de trouver un chemin qui ne consomme pas trop d' énergie et qui ne soit pas trop long également [20].

Toute conception de protocole de routage doit prendre en considération les contraintes suivantes:

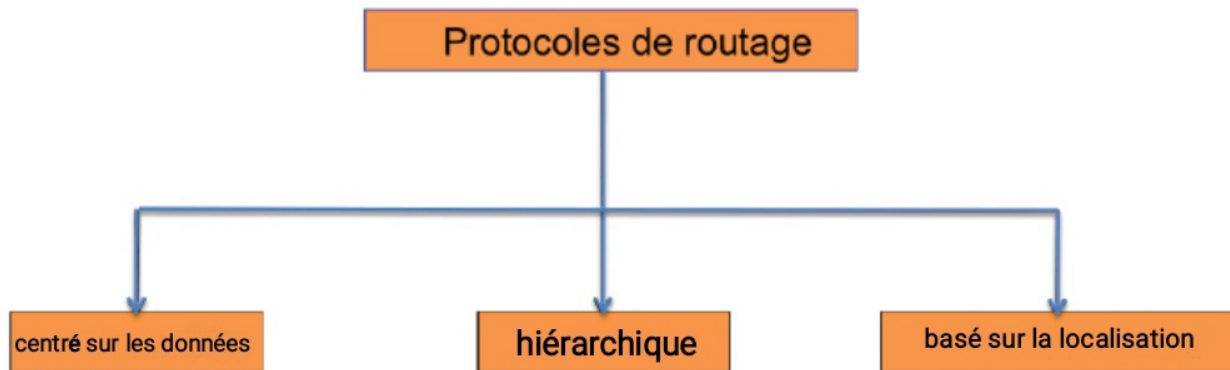
- ✓ La minimisation de la charge du réseau.
- ✓ Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables.
- ✓ Assurer un routage presque optimal.
- ✓ Offrir une bonne qualité de service en termes de latence et permettre la tolérance aux pannes pour garantir l' acheminement des données quand certains nœuds cessent de fonctionner.

### II.2.2 Classification des protocoles de routage pour RCSF

Certains critères caractérisent les applications de réseaux RCSF tels que :

- la détection de données à partir de plusieurs régions (sources) vers un nœud particulier (nœud puits),
- une redondance importante puisque plusieurs capteurs peuvent générer les mêmes données dans le voisinage d' un phénomène,
- les nœuds capteurs étroitement limités en termes de puissance de transmission, d' énergie, de capacité de traitement et de stockage.

Partant de ces critères, plusieurs algorithmes d' acheminement de données ont été proposés. Tous ces mécanismes de routage peuvent être classés en trois catégories comme l' indique la figure 2.1 : centré sur les données (dit aussi ' plat'), hiérarchique et basé sur la localisation.



**Figure 2.1** Classification des protocoles de routage pour RCSF

Les protocoles centrés sur les données sont fondés sur une requête et dépendent de la dénomination des données désirées, qui aide à éliminer les nombreuses transmissions redondantes. Les protocoles hiérarchiques visent à regrouper les nœuds afin que les cluster heads (CHs) puissent faire l'agrégation et la réduction de données en vue d'économiser l'énergie. Les protocoles basés sur la localisation utilisent les informations de position pour transmettre les données vers les régions souhaitées, plutôt que l'ensemble du réseau.

### ***II.2.2.1 Routage plat***

Ce routage centré sur les données, est le modèle le plus simple où chaque nœud dans le réseau transmet les données à la station de base [21]. Chaque nœud joue typiquement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent entre eux pour accomplir la même tâche. La station de base envoie des requêtes à certaines régions et se met en attente des données des capteurs situés dans les régions choisies. Parmi les protocoles de cette catégorie : SPIN (*Sensor Protocol for Information via Negotiation*) et le Protocole DD (*Directed Diffusion*).

### ***II.2.2.2 Routage basé sur la localisation***

Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations [22]. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée en fonction de la puissance du signal reçu (RSSI). Les coordonnées relatives des nœuds voisins peuvent être

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

obtenues en échangeant une telle information entre les voisins. Alternativement, la localisation des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite en utilisant le système GPS ou par le biais d' un nœud mobile diffusant à plusieurs endroits sa localisation qui pourra être captée par les nœuds capteurs se trouvant dans le rayon de transmission. Dans la plupart des protocoles de routage, l' information sur la localisation des nœuds est nécessaire afin de calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d' énergie puisse être estimée. Nous citons comme exemples de protocoles le MECN (*Minimum Energy Communication Network*) et GAF (*Geographic Adaptive Fidelity*).

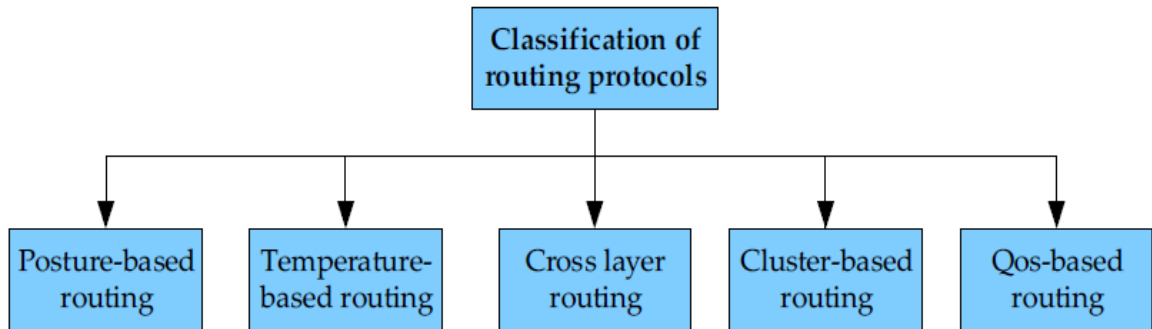
### II.2.2.2 Routage hiérarchique

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l' approche la plus favorable en termes d' efficacité énergétique sur tout dans les réseaux de capteurs à grande échelle [23]. Il se base sur le concept (nœud simple -nœud maître) où les nœuds simples acheminent leurs messages à leur maître, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d' autres nœuds maîtres jusqu' à l' aboutissement à la station de base. L' avantage principal de ce type de routage est l' agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages redondants transmis à la station de base, ce qui permet une meilleure conservation de l' énergie.

Comme exemples de protocoles de routage hiérarchique nous pouvons citer : LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) et PEGASIS (*Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems*).

### II.2.3 Classification des protocoles de routage pour WBAN

A l'heure actuelle, la recherche sur les protocoles de routage pour WBAN [67,68] est principalement divisée en les méthodes suivantes (figure 2.2) :



**Figure 2.2** Classification des protocoles de routage pour WBANs

### *II.2.3.1 Routage basé sur la posture (posture-based)*

Le routage basé sur la posture est utilisé pour analyser la topologie du réseau du corps humain dans diverses postures dynamiques afin d'établir un chemin rapide et stable. L'analyse des différentes postures est d'une grande importance. Dans l'environnement dynamique, le mouvement des membres rend la topologie du réseau bonne ou mauvaise et produit également un effet d'ombre. Les solutions existantes ne peuvent être traitées qu'après que la situation se soit produite, ce qui était très passif et avait un grand retard. Si la prochaine action est prédite à l'avance dans l'intervalle de temps actuel, le jugement et le traitement peuvent être effectués à l'avance, ce qui est très utile pour réduire le retard et améliorer le taux de transmission des données, avec succès [69].

De nouveaux protocoles sont développés dans ce type de routage, nous citons :

- MHRP (*A Novel Mobility Handling Routing Protocol*), ce protocole est conçu pour l'acquisition de la fréquence cardiaque.
- NCMD (*Energy-Efficient and Distributed Network Management Cost Minimization*), algorithme d'établissement de lien de transmission opportuniste, pour minimiser le coût de gestion du réseau et optimiser la QoS.

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

### *II.2.3.2 Routage basé sur la température (temperature-based)*

Le routage basé sur la température considère la température des nœuds comme le paramètre principal dans le processus de sélection du chemin. L'objectif principal de cette méthode de routage est d'éviter l'échauffement des nœuds, ou réduire rapidement la température des nœuds dont la température est élevée, en évitant les nœuds à haute température et en établissant des chemins appropriés [69].

Le routage basé sur la température a été largement étudié au début de la période de développement du WBAN, mais ces dernières années, un grand nombre d'études se sont concentrées sur l'énergie, de sorte que le processus de routage basé sur la température a été légèrement réduit. Exemples de protocoles :

- TARA (*Thermal-Aware Routing Algorithm*) : première œuvre classique proposée dans ce domaine
- ER-ATTEMPT (*A New Energy-Efficient Routing Protocol*) : qui non seulement évite les nœuds à haute température, mais choisit également le chemin avec le minimum de sauts comme meilleur itinéraire.

### *II.2.3.3 Routage inter-couche (cross-layer routing)*

Le protocole de routage inter-couche intègre principalement plusieurs couches de la pile protocolaire en prenant en compte leur avantages pour obtenir de meilleures performances réseau [69]. Des expériences ont montré que la méthode inter-couches est plus adaptable aux WBAN dynamiques et que la collaboration entre différentes couches peut mieux servir différentes données prioritaires, fournir des services personnalisés pour chaque type de données et obtenir des performances réseau complètes avec une faible latence, une fiabilité élevée et une économie d'énergie.

- PCLRP (*Priority-Based Cross Layer Routing Protocol*) désigne un protocole qui implique la couche MAC ainsi que la couche réseau,



## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

- alors que CLRS (*Cross-Layer Retransmit Strategy*) est une méthode basée sur le standard IEEE 802.15.6 désignée à retransmettre les paquets de données qui ont échoués lors de la transmission.

### II.2.3.4 Routage basé sur le clustering (cluster-based)

Le routage basé sur des clusters est une méthode empruntée au RCSF. Le protocole LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) est un œuvre classique dans le RCSF, et la méthode de routage basée sur les clusters en est issue ; de nombreuses expériences ont prouvé que la méthode de clustering est plus adaptée aux WBAN. Lorsque le nombre de nœuds augmente et que la distance relative entre les nœuds augmente, la méthode de clustering peut assurer la connectivité du réseau, équilibrer la consommation d'énergie du centre et de la périphérie du réseau, s'adapte à une structure dynamique et améliore la robustesse du réseau [69].

- DSCB (*Dual Sink Approach Using Clustering*) : Suite à l'analyse du routage à puits unique et ses différentes défaillances, le DSCB a été proposé comme nouveau protocole de routage à double nœud puits basé sur le clustering.
- CRPBA (*An Energy Efficiency Routing Protocol*) : qui fait référence aux nœuds puits en tant que nœud de passerelle.

### II.2.3.5 Routage basé sur la QoS (QoS-based)

Le routage basé sur la qualité de service joue un rôle important dans toute technologie d'application, en particulier dans le WBAN à ressources limitées, ce qui représente un énorme défi [69]. Les QoS qui doivent être pris en compte dans le WBAN sont la priorité des données, l'efficacité énergétique, la fiabilité de la liaison et la fiabilité de la transmission des données, le faible délai de transmission, la température du nœud, la sécurité des données, etc.

Il existe de nombreux protocoles de routage dans les WBAN qui traitent la QoS dont :

- LRPD (*Designing Lightweight QoS Routing Protocol*) spécialement désigné pour optimiser la QoS du retard.

## II.3 Clustering

### II.3.1 Définition d' un cluster

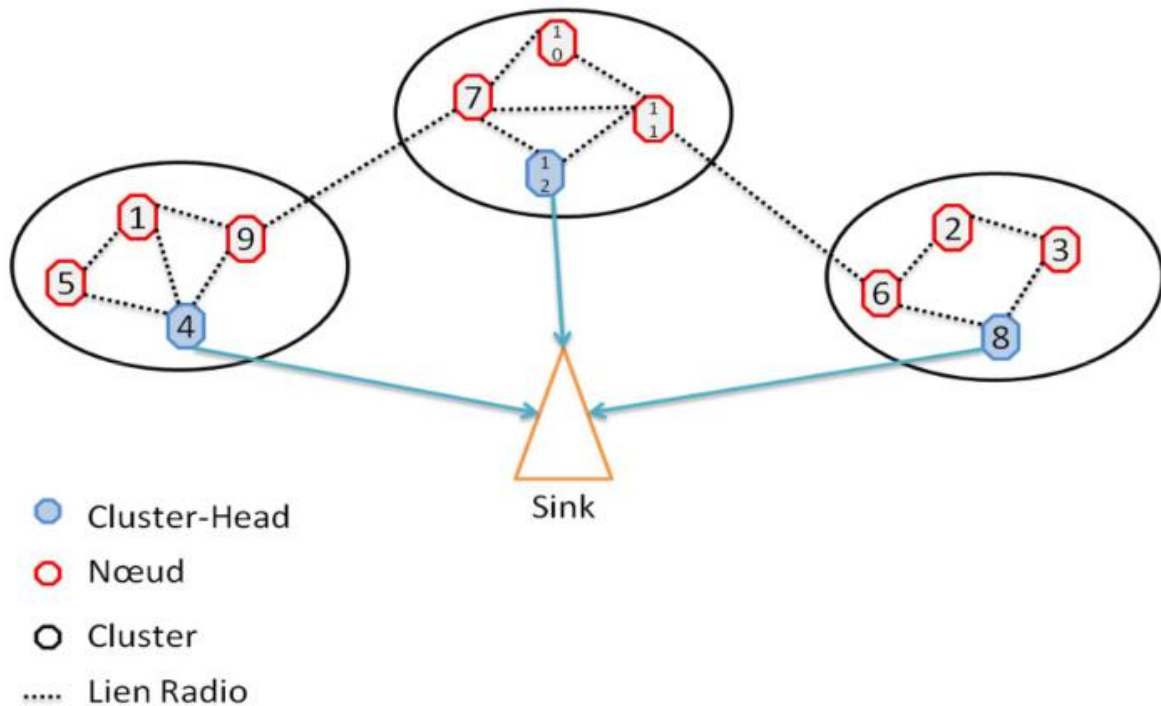
Le cluster est un système réalisant du calcul parallèle, qui consiste en un ensemble de calculateurs individuels interconnectés entre eux, et travaillant ensemble comme une unique ressource de calcul [20]. Un nœud de calcul peut être un système monoprocesseur ou multiprocesseur comportant de la mémoire, des accès entrées/sorties, et un système d' exploitation. L' ensemble des nœuds de calcul apparaît alors comme un système unique du point de vue des applications où chaque cluster est généralement identifié par un centre de cluster (dit *centroïde*).

Pour construire les clusters d' un réseau, nous définissons quatre états différents d' un nœud :

- ✓ **Ordinaire** : état initial d' un nœud déconnecté de la structure de communication (généralement en attente d' un signal).
- ✓ **Leader** : état d' un puits initiant la construction de son cluster. Il s' agit de la racine de l' arbre en formation ou encore du chef de cluster (Cluster-Head).
- ✓ **Membre**: nœud intermédiaire entre la racine et les feuilles d' un arbre de cluster.
- ✓ **Gateway**: nœud intermédiaire entre les clusters.

### II.3.2 Définition du clustering

L' approche de Clustering consiste à partitionner le réseau en un certain nombre de clusters, plus homogènes selon une métrique spécifique ou une combinaison de métriques, et former une topologie virtuelle. Les clusters sont généralement identifiés par un nœud particulier appelé *Cluster-Head*. Ce dernier permet la coordination entre les membres de son cluster, d' agréger leurs données collectées à travers des liens radio et de les transmettre à la station de base (figure 2.3).



**Figure 2.3** Principe du Clustering

Le clustering de données est un problème difficile dans la reconnaissance de modèles non supervisée car les clusters peuvent avoir différentes formes et tailles.

### II.3.3 Etapes du clustering

Afin de hiérarchiser ou de répartir les données faisant partie d' un réseau, le processus de clustering s' effectue en trois étapes principales :

- **Première étape** : La préparation des données,
- **Deuxième étape** : Le choix de l' algorithme de clustering et
- **Troisième étape** : La validation et interprétation des résultats.

Selon le choix des critères pris en compte pour l' organisation des données, plusieurs algorithmes de clustering existent et sont utilisés.

### II.3.4 Méthodes de clustering de base

Il existe une trentaine de méthodes de clustering dans la littérature et leurs variations sont incluses dans différentes familles. Nous présentons dans ce qui suit le principe de quelques méthodes de base de regroupement des données en clusters, avec chacune ses avantages et ses inconvénients.

On distingue les grandes familles de méthodes de clustering suivantes [70]:

- ✓ Les méthodes hiérarchiques,
- ✓ les méthodes par partitionnement,
- ✓ les méthodes à base de densité et
- ✓ les méthodes basées sur un modèle.

### II.3.5 Clustering hiérarchiques

Le fondement du clustering hiérarchique est de construire une hiérarchie de clusters ou un arbre de clusters, connu aussi sous le nom de dendrogramme. Chaque nœud contient ses clusters enfants, et les nœuds frères partitionnent les objets contenus dans leurs parents. Ce type d'approche permet d'explorer les données à différents niveaux de granularité.

Afin de parvenir à un tel arbre hiérarchique de clusters, il existe deux types d'approches, à savoir, l'approche ascendante, dite *agglomérative* (CHA) fusionner jusqu' à n'obtenir plus qu' un unique groupe contenant tous les objets du jeu de données, et descendante, dite *divisive* (CHD) qui part, de l' ensemble des données et les divisent en clusters qui sont ensuite divisés récursivement.

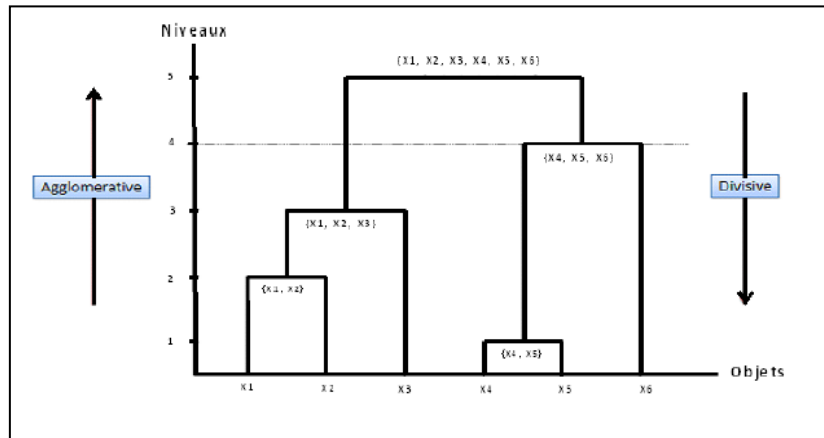


Figure 2.4 Exemple d'un dendrogramme

### II.3.5.1 L'approche ascendante ou agglomérative (CHA) :

Les algorithmes hiérarchiques agglomératifs commencent par chaque modèle affecté à un cluster. Ensuite, les deux clusters les plus similaires sont fusionnés. Cette étape est répétée jusqu'à ce que tous les modèles soient affectés à un seul cluster [1]. Plusieurs agglomérations hiérarchiques des algorithmes ont été proposées dans la littérature qui diffère par la manière dont les deux clusters les plus similaires sont calculés. Les deux algorithmes hiérarchiques agglomératifs les plus populaires sont : « *single link* » [2], et « *complete link* » [3].

« *Single link algorithmes* » fusionne les clusters dont la distance entre les motifs les plus proches est la plus petite.

« *Complete link algorithmes* » fusionne les clusters dont la distance entre leurs motifs les plus éloignés est la plus petite.

Ces derniers sont généralement plus utilisés que les *Single link algorithmes* [4].

Il y a d'autres algorithmes moins populaires comme « *centroid méthodes* » [3] qui fusionne les clusters dont la distance entre leurs centres de gravité est la plus petite mais il a un inconvénient majeur tel que la caractéristique d'un très petit cluster est perdue lors de la fusion avec un très grand cluster[1].

L' algorithme de la classification ascendante hiérarchique est très simple. Il est dû à Lance et William (1967) [5] et comporte les étapes suivantes :

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

**Initialisation** construction du tableau des distances, peu importe la formule utilisée pour le construire car l' algorithme de CHA est indépendant de la métrique utilisé. Ainsi, entre chaque couple de point  $(x, y)$  de  $M$ , nous disposons d' une valeur  $d(x, y)$ . La partition initiale est la plus fine  $\rho_0$  de  $M$ .

**Regroupement** parcourir le tableau de distance pour déterminer le couple d'élément  $(x^*, y^*)$  les plus proches:

$$d(x^*, y^*) \leq \min_{x, y \in M} \{d(x, y)\}$$

On réunit les deux éléments dans une même classe  $A = x^* \cup y^*$  les autres classes restent inchangées. Nous obtenons une nouvelle partition  $\rho_i$  moins fine que la précédente.

**Tableau des distances** la classe  $A$  sera vue comme un seul point. Il faut donc calculer les distances qu'il y a entre le point  $A$  qui est un ensemble de cardinal supérieur à un, et tous les autres points qui ne sont pas dans  $A$  et peuvent être des singleton notés  $B$ .

$$d(A, B); B \notin A$$

Pour cela, on peut utiliser un critère proposé durant l'étape d'initialisation. Nous disposons alors d'un nouveau tableau des distances ayant une ligne et une colonne de moins que le précédent dont il ne diffère que par une ligne et une colonne qui correspond au point  $A$ .

**Condition d' arrêt** si nous avons atteint la partition du niveau souhaité, généralement  $c'$  est la partition grossière, celle qui ne comporte qu' une seule classe réunissant la totalité des points, alors,  $c'$  est terminé. Dans le cas contraire, nous repartons de l' étape regroupement à partir du tableau des distances calculé à la suite du précédent regroupement.

### *II.3.5.2 L'approche descendante ou divisive (CHD) :*

Les algorithmes hiérarchiques divisives commencent avec tous les modèles assignés à un seul cluster. La division est appliquée à un cluster à chaque étape jusqu'à ce que chaque cluster se compose d'un modèle. Elles partent de l' ensemble des individus et procèdent par divisions successives des classes jusqu' à l' obtention de classes vérifiant certaines règles d' arrêt pour

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

les différencier des méthodes ascendantes qui partent des singletons et qui procèdent par agrégations successives. L' algorithme descendant est généralement exponentielle. En effet, lors de la première étape d' une méthode ascendante, il faut évaluer toutes les agrégations possibles de deux individus parmi  $n$ , soit :  $n(n - 1)/2$  possibilités, tandis qu' un algorithme descendant basé sur l' énumération complète évalue toutes les divisions des  $n$  individus en deux sous-ensembles non vides, soit :  $2^{n-1} - 1$  possibilités [6].

Parmi les méthodes CHD nous citons : la méthode DIVAF [7] et la méthode DIVOP [8].

### *II.3.5.3 Caractéristiques des méthodes hiérarchiques :*

En général, les méthodes hiérarchiques sont caractérisées par [17]:

- Polyvalence : Les méthodes à lien unique, par exemple, maintiennent de bonnes performances sur des ensembles de données contenant des clusters non isotropes, des clusters bien séparés, en forme de chaîne et concentriques.
- Partitions multiples : les méthodes hiérarchiques ne produisent pas une partition, mais plusieurs partitions imbriquées, qui permettent à différents utilisateurs d'en choisir certaines, en fonction du niveau de similitude souhaité. La partition hiérarchique est présentée à l'aide du dendrogramme.

### *II.3.5.4 Avantages et inconvénients des méthodes hiérarchiques :*

Les méthodes hiérarchiques ont des avantages tels que :

- La réduction du temps de conception,
- la documentation complète de la conception,
- la lecture de l' arbre permet de déterminer le nombre optimal de classes.

Mais présentent aussi des inconvénients :

- La différence dans les hiérarchies.
- Coûteux en temps de calcul.
- Problèmes de disposition du circuit.
- Incapacité à bien évoluer.

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

- Pas de possibilité de suivi arrière. Les méthodes hiérarchiques ne peuvent jamais annuler ce qui a été fait précédemment.
- Multiplicité des représentations hiérarchiques.

### II.3.6 Clustering par partitionnement

Une approche typique des méthodes de partitionnement est l' utilisation de méthodes itératives. Produire une classification par partitionnement revient à produire plusieurs classes non vides en déplaçant les éléments d' un cluster à un autre, à partir d'un partitionnement initial (le nombre de classes ou cluster étant souvent défini à l' avance) [12]. L' algorithme a pour objectif de minimiser ce critère  $U$  défini a priori.

Plusieurs approches sont utilisées dans ces méthodes par partitionnement dont :

- L' approche géométrique basée sur le calcul d' une distance selon la formule :

$$U = \sum_{i=1}^K \sum_{\mathbf{x} \in C_i} d^2(\mathbf{x}, \mathbf{m}_i) = \sum_{i=1}^K \sum_{\mathbf{x} \in C_i} \|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\|^2$$

- L' approche probabiliste : selon une certaine vraisemblance.
- L' approche prototype : une fonction quelconque est utilisée qui dépend du type de données dont on dispose.

#### II.3.6.1 Principe des algorithmes de clustering par partitionnement

Ces méthodes comportent 5 étapes principales [12] :

**Etape1:** On choisit aléatoirement  $k$  individus comme centres initiaux des classes.

**Etape 2:** On attribue chaque objet à la classe la plus proche, ce qui définit  $k$  classes.

**Etape 3:** Connaissant les membres de chaque classe on recalcule les centres d' inertie de chaque classe.



## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

**Etape 4:** On redistribue les objets dans la classe qui leur est la plus proche en tenant des nouveaux centres de classe calculés à l' étape précédente.

**Etape 5:** On retourne à l' étape 3 jusqu' à ce qu' il y ait convergence, c'est-à-dire jusqu' à ce qu' il n' y ait plus aucun individu qui change de classe.

### *II.3.6.2 Algorithme K-Means*

Le principe de cet algorithme, le barycentre de chaque groupe est recalculé à chaque nouvel individu introduit dans le groupe, au lieu d' attendre l' affectation de tous les individus. C' est un algorithme de quantification vectorielle qui va chercher à séparer un ensemble de points en  $K$  clusters. K-Means défini par McQueen est un des plus simples algorithmes de classification automatique des données. L' idée principale est de choisir aléatoirement un ensemble de centres fixé à priori et de chercher itérativement la partition optimale. Chaque individu est affecté au centre le plus proche en utilisant la distance Euclidienne. Après l' affectation de toutes les données, la moyenne de chaque groupe est calculée, elle constitue les nouveaux représentants des groupes, lorsqu' ont abouti à un état stationnaire (aucune donnée ne change de groupe) l' algorithme s' arrête [13].

Dans la figure 2.4 les étapes de l' algorithme K-Means:

**Input:**  $S$  (instance set),  $K$  (number of cluster)  
**Output:** clusters

- 1: Initialize  $K$  cluster centers.
- 2: **while** termination condition is not satisfied **do**
- 3:     Assign instances to the closest cluster center.
- 4:     Update cluster centers based on the assignment.
- 5: **end while**

**Figure 2.5** Algorithme k-Means.

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

### *II.3.6.3 Algorithme Fuzzy C-Means*

L'algorithme Fuzzy C-Means (*FCM*) est le plus largement utilisé parmi les algorithmes Fuzzy [18]. La classification floue des moyennes a été rapportée pour la première fois dans la littérature pour un cas particulier ( $m = 2$ ) par Joe Dunn en 1974. Le cas général (pour tout  $m$  supérieur à 1) a été développé par Jim Bezdek en 1973. Elle a été améliorée par Bezdek en 1981.

Le FCM utilise un partitionnement flou qu'un point de données peut appartenir à tous les groupes avec des notes d'adhésion comprises entre 0 et 1. Cet algorithme fonctionne en attribuant une appartenance à chaque point de données correspondant à chaque centre de cluster sur la base de la distance entre le centre du cluster et le point de données. Clairement, la somme des membres de chaque point de données doit être égale à 1. Après chaque itération les centres d'adhésion et de cluster sont mis à jour selon les formules utilisées.

Parmi les avantages de cet algorithme : il est non supervisé et converge vers une solution, mais il présente un temps de calcul long, une sensibilité à l'estimation initial et une sensibilité au bruit.

L' algorithme Fuzzy C-Means est représenté dans la figure 2.6 suivante :

1. Initialize  $U=[u_{ij}]$  matrix,  $U^{(0)}$
2. At  $k$ -step: calculate the centers vectors  $C^{(k)}=[c_j]$  with  $U^{(k)}$ 

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^m u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^m u_{ij}^m}$$
3. Update  $U^{(k)}, U^{(k+1)}$
4.
$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - c_i)^2}$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left( \frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)}}$$
5. if  $\|U(k+1) - U(k)\| < \epsilon$  then STOP; otherwise return to step 2.
- 6.

Here  $m$  is any real number greater than 1,

$u_{ij}$  is the degree of membership of  $x_i$  in the cluster  $j$ ,  
 $x_i$  is the  $i$ th of  $d$ -dimensional measured data,  
 $c_j$  is the  $d$ -dimension center of the cluster,

**Figure 2.6** Algorithme Fuzzy C-Means

### II.3.6.4 ISODATA

La méthode ISODATA est un algorithme itératif, comme le K-Means [14]. L' hypothèse fondamentale de l' algorithme ISODATA est que la distribution de chaque classe suit une loi décroissante à partir de sa moyenne  $\mu_k$ . L' affectation optimale d' un individu  $x_i$  à une classe peut donc se faire en sélectionnant la classe  $C_k$  dont le centre de gravité  $g_k$  est le plus proche de  $x_i$  selon une métrique donnée.

#### Entrée :

- un tableau croisant l' ensemble  $X$  des individus  $x_i$  à classer et l' ensemble des attributs ( $N_x N_a$ ),

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

- Connaissances *a priori* à fournir par l' utilisateur :

- le nombre minimum  $N_{min}$  et maximum  $N_{max}$  de classes  $N_c$ ,
- le nombre maximum d' itérations,
- le nombre minimum de pixels  $N_{min}$  par classe,
- le seuil maximum de la variance des classes,
- la distance minimale entre les centres de gravité des classes,
- le nombre maximum de paires de classes pouvant être fusionnées.

**Sortie :** Partition de l' ensemble  $X$  en  $N_c$  classes.

**Algorithme :**

1. Normaliser les données,
2. Affecter aléatoirement les  $N$  individus à  $N_{min}$  classes,
3.  $t = 0$ ,
4. Tant que le résultat de partitionnement change OU  $t < t_{max}$ 
  - $t = t+1$ ,
  - Calculer les centres de gravité des classes  $g_i$ ,
  - Affecter chaque individu à la classe dont le centre est le plus proche,
  - Éliminer les classes comportant moins de  $N_{min}$  individus, et affecter les individus orphelins aux classes dont les centres sont les plus proches,
  - Recalculer les centres des classes,
  - Si deux classes sont suffisamment proches suivant la distance L1, les rassembler,
  - Si la valeur de la variance intra-classe est trop importante, partitionner la classe en deux classes,
  - Recalculer les centres des classes Fin tant que.

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

Cet algorithme fournit une approximation des moyennes des distributions de probabilité par classe, selon le critère du maximum de vraisemblance. Il donne de bons résultats dans le cas de distributions normales [15]. Pour les données réelles, cet algorithme est moins performant ; de plus, il nécessite la connaissance *a priori* des paramètres cités plus haut dont le réglage est difficile à optimiser.

### ***II.3.6.5 Fast Global K-Means***

L'algorithme Global K-Means [16] peut obtenir de meilleurs résultats de clustering sauf que la quantité de calcul est trop grande. Pour cela, cet algorithme est modifié par Likas et d'autres chercheurs, appelé l'algorithme Fast Global K-Means. Cet algorithme, en calculant  $b_n$ , sélectionne son correspondant échantillonné lorsque  $b_n$  est maximum comme centre de regroupement optimal, réduit encore la quantité de calcul.  $b_n$  est défini comme :

$$b_n = \sum_{j=1}^N \max(d_{K-1}^j - \|x_n - x_j\|^2, 0)$$

Où,  $d_{K-1}^j$  désigne la distance entre  $x_j$  au plus proche centre de regroupement.

Les expériences montrent qu'une comparaison entre l'algorithme Fast global K-Means et l'algorithme global K-Means, peut réduire le temps d'exécution du clustering sans affecter la masse de regroupement.

### ***II.3.6.6 K-Means++***

Une manière spécifique est adoptée pour choisir les centres dans l'algorithme K-Means [19]. En particulier,  $D(x)$  désigne la distance la plus courte entre un point de données et le centre le plus proche déjà choisi. Ensuite, l'algorithme dit K-Means ++ est défini comme suit :

- 1a. Prenez un centre  $c_1$ , choisi uniformément au hasard parmi  $X$ .
- 1b. Prenez un nouveau centre  $c_i$ , en choisissant  $x \in X$  avec probabilité :

$$\frac{D(x)^2}{\sum_{x \in X} D(x)^2}$$

1c. Répétez l'étape 1b. Jusqu'à ce que nous ayons pris k centres au total.

2-4. Procédez comme avec l'algorithme standard k-Means.

La pondération utilisée à l'étape 1b est appelée «pondération D2».

### *II.3.6.7 Avantages et inconvénients des méthodes par partitionnements*

Les algorithmes basés sur le principe de partitionnement des données présentent l'avantage [70] d'être facile à implémenter en plus de leur rapidité et leur faible exigence en taille mémoire. Ainsi ils sont applicables sur des bases de données volumineuses en choisissant une fonction de distance. Comme toute méthode de programmation, ces algorithmes présentent des inconvénients [70]:

- Les conditions d'arrêt de l'exécution de l'algorithme doivent être fixées au préalable par l'utilisateur (un nombre d'itérations prédéfini ou une certaine stabilité de données).
- Ces algorithmes sont influencés par les paramètres choisis aléatoirement dans la partition initiale (le nombre de cluster  $k$ ).

### **II.3.7 Clustering à base de densité**

Le clustering basé sur la densité découvre des grappes de formes arbitraires dans des bases de données spatiales avec du bruit [20]. Ici, la densité peut être définie comme le nombre de points dans un rayon spécifié. Les techniques de clustering basées sur la densité comprennent principalement trois techniques: DBSCAN (clustering spatial basé sur la densité d'application avec bruit), OPTICS (points de commande pour identifier la structure de clustering), DENCLUE (DENsity CLUstering).

- DBSCAN développe des clusters selon une approche de connectivité basée sur la densité détaillée dans le paragraphe suivant.

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

- OPTICS pour produire un cluster, ici, les points de la base de données sont ordonnés linéairement de telle sorte que les points spatialement les plus proches deviennent voisins dans l'ordre.
- DENCLUE, regroupe les objets en fonction de la notion de fonction d'estimation du noyau.

### II.3.7.1 DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*)

DBSCAN est le premier algorithme de clustering basé sur la densité. Il a été proposé par Ester et al. en 1996, et il a été conçu pour regrouper des données de formes arbitraires en présence de bruit dans des bases de données spatiales et non spatiales de grande dimension. En plus de former des classes d'individus, l'algorithme repère par la même occasion les valeurs hors du commun que l'on qualifie de bruit.

Il prend deux paramètres en entrée :  $\mathcal{E}$  la distance maximale qui peut définir deux individus comme voisins, et  $N$  le nombre minimal d'individus nécessaires pour former un groupe. A partir de là, l'algorithme est assez intuitif. On aura besoin de stocker deux informations : les clusters successifs et les individus visités au fur et à mesure.

La première étape consiste à choisir un point parmi les  $n$  disponibles. Grâce au paramètre  $\mathcal{E}$ , on peut définir le voisinage du point initial, c'est-à-dire l'ensemble des points que l'on peut qualifier comme ses voisins.

- Et grâce au paramètre  $N$ , on peut dire que si cet ensemble est constitué de moins de  $N$  points, alors le point initial correspond à du bruit. On le stocke alors dans les individus visités.
- A l'inverse si le voisinage comprend plus de  $N$  points, alors on peut initialiser un cluster avec le point de départ. On étudie chaque point de son voisinage initial.

Et pour tout point de ce voisinage, si son propre voisinage comporte plus de  $N$  éléments, alors on étend le voisinage initial en le réunissant avec le voisinage du point visité.

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

Puis on ajoute ce point dans le cluster. Une fois que tous les points du voisinage ont été testés, ceux retenus dans le cluster sont stockés comme individus visités. Et le cluster obtenu est stocké dans la liste des clusters.

Tant que tous les individus n'ont pas été visités, on réitère cette étape en commençant par choisir un individu parmi ceux qui sont encore *disponibles*. Et on obtient finalement notre liste de groupes d'individus ainsi que les individus correspondant à du bruit.

### *II.3.7.2 Avantages et inconvénients de DBSCAN*

DBSCAN présente de grands avantages par rapport aux autres algorithmes de clustering. Premièrement, il ne nécessite pas du tout un nombre de clusters prédéfini. Il identifie également les valeurs aberrantes comme des bruits, contrairement à la méthode K-Means. De plus, il peut très bien trouver des clusters de taille et de forme arbitraires [20].

Le principal inconvénient de DBSCAN est qu'il ne fonctionne pas aussi bien que les autres lorsque les clusters sont de densité variable. En effet, le réglage du seuil de distance  $\mathcal{E}$  et du minimum de points  $N$  pour identifier les points de voisinage variera d'un cluster à l'autre lorsque la densité varie. Ces deux paramètres doivent être ajustés en conséquence. Cet inconvénient se produit également avec des données de très grande dimension car là encore le seuil de distance devient difficile à estimer [20].

### **II.3.8 Clustering basé sur un modèle**

Les méthodes de clustering basées sur un modèle tentent d'optimiser l'ajustement entre les données et un modèle mathématique. Ces méthodes reposent souvent sur l'hypothèse que les données sont générées par un mélange de distributions de probabilités sous-jacentes. Les méthodes de clustering basées sur des modèles suivent deux approches principales: l'approche statistique (probabiliste) et l'approche par réseau neuronal.

Pour le clustering basé sur un modèle, des modèles de mélange finis et infini ont été utilisés pour ajuster une distribution appropriée aux données et, dans une étape ultérieure, pour



## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

déduire les appartenances aux clusters à partir des distributions ajustées et, potentiellement, obtenir des informations sur les caractéristiques typiques des distributions de cluster. Fraley et Raftery (2002) [27] soulignent que le clustering basé sur un modèle intègre le problème de cluster dans un cadre probabiliste. Le cadre statistique permet d'employer des méthodes d'inférence statistique pour obtenir un regroupement approprié des données.

Le point de départ du regroupement basé sur un modèle est de définir la distribution d'un cluster et de décider de la façon dont les tailles de cluster sont distribuées. La définition du canal de distribution de cluster peut également être considérée comme la spécification du noyau de clustering [28]. En fonction des données disponibles et de ses caractéristiques, différents noyaux conviennent. En outre, le but de l'analyse de cluster et les caractéristiques de la solution de cluster prévue guident également le choix du noyau de clustering. L'exigence selon laquelle une distribution de cluster doit être spécifiée rend le clustering basé sur un modèle en général plus transparent par rapport aux solutions de clustering ciblées, tandis que dans les applications de méthodes heuristiques, les caractéristiques des solutions de clustering ciblées restent souvent implicites. Dissemblance entre les observations et les groupes d'observations. Les méthodes basées sur des modèles utilisent également une notion de similitude entre les observations.

### *II.3.8.1 L' algorithme de maximisation des attentes (EM)*

L'algorithme Expectation-maximisation (abrégé, EM) [70] est un algorithme qui utilise une approche probabiliste. Il considère que les données ont été générées par un mélange de modèles statistiques dont il cherche à déterminer les paramètres. Dès lors, il est possible d'associer les paramètres (moyenne, variance,..., etc) de chaque modèle à un cluster. Le modèle de probabilité le plus connu est le modèle de mélange gaussien où les densités élémentaires sont des lois normales. Dans cette technique, chaque cluster est décrit par une loi de distribution normale paramétrée par son centre de gravité et sa matrice de variance covariance. Ainsi, L'algorithme (EM) tient compte des centres de clusters mais également de la forme des nuages de points à travers la matrice de variance covariance.

L'algorithme (EM) comporte les deux étapes (E) et (M) suivantes :

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

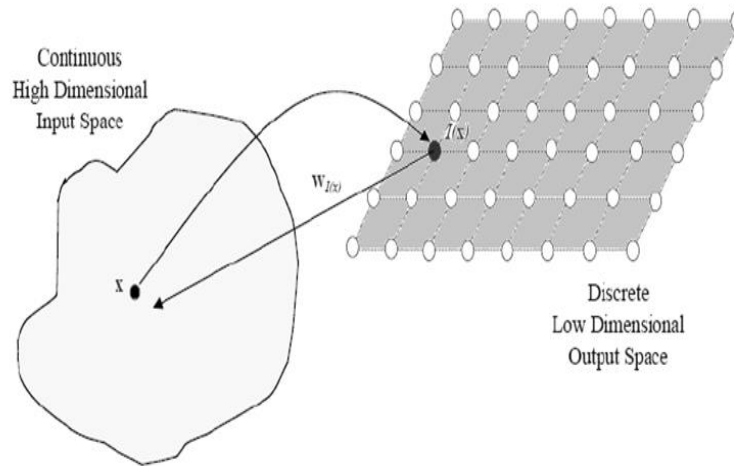
- Une étape d'évaluation de l'espérance (E), où l'on calcule l'espérance de la vraisemblance en tenant compte des dernières variables observées,
- Une étape de maximisation (M), où l'on estime le maximum de vraisemblance des paramètres en maximisant la vraisemblance trouvée à l' étape (E).

On utilise ensuite les paramètres trouvés à l'étape (M) comme point de départ d'une nouvelle phase d'évaluation de l'espérance, et l'on itère ainsi.

### *II.3.8.2 L' algorithme Self Organizing Maps (SOM)*

La méthode des cartes auto-organisatrices de Kohonen [70] (abrégé, SOM) est un algorithme de classification non supervisée basé sur un réseau de neurones artificiels. Les neurones de la couche de sortie sont reliés entre eux pour former un réseau qui reste fixe durant l'apprentissage. Chaque neurone possède des coordonnées dans l'espace des données et représente un prototype d'une classe. Deux neurones reliés s'influencent l'un à l'autre au cours de l'apprentissage. L'algorithme SOM permet de découvrir la topologie des données.

L'algorithme SOM permet de découvrir la topologie des données. Les neurones proches les uns des autres dans cette topologie, souvent rectangulaire (figure 2.6) peuvent correspondre à la même classe.



**Figure 2.7** Topologie de l' algorithme SOM

Cet algorithme est considéré comme une méthode de quantification vectorielle, regroupant les points en leur classe respective tout en tenant compte de leur topographie dans l'espace des observations.

Les principales étapes de l'algorithme SOM sont les suivantes :

**Initialisation** à l'instant ( $t = 0$ ), les vecteurs de poids de connexion du neurone  $K$  sont initialisés de manière aléatoire :

$$W_K = [W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}], \quad k = 1, 2, \dots, K$$

**Compétition** à l'instant ( $t > 0$ ), un vecteur de modèle d'entrée est présenté au réseau:

$$X(t) = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

Ensuite, une fonction de distance est calculée pour tous les vecteurs de poids, ce qui constitue la base de la compétition entre les neurones. Le neurone dont le vecteur de poids est le plus similaire au motif d'entrée est déclaré vainqueur de la compétition ou de la meilleure unité

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

(*BMU : Best Motif Unit*). La fonction discriminante pour trouver le BMU est généralement la distance euclidienne de  $X(t)$  à  $w_k(t)$ :

$$d_K(t) = \|X(t) - w_K(t)\| \quad (2.9)$$

Le neurone gagnant C est celui qui détient la plus petite valeur de la fonction de distance :

$$d_C(t) = \min_K d_K(t)$$

**Coopération** le neurone gagnant excite ses neurones voisins en utilisant la fonction de voisinage gaussienne :

$$h_{CK}(t) = \exp\left[\frac{-d^2(K,C)}{2\sigma^2(t)}\right]$$

$d^2(K,C)$  : est la distance entre le neurone gagnant C et le neurone voisin K dans le réseau.  
 $\sigma$ (sigma): représente la largeur effective du voisinage à un instant t.

**Adaptation (processus d'apprentissage)** les vecteurs de pondération situés dans le voisinage du neurone gagnant sont mis à jour à l'aide de l'équation suivante :

$$w_K(t + 1) = w_K(t) + \alpha(t)h_{CK}(t) [X(t) - w_K(t)]$$

$\alpha$  est le paramètre d'apprentissage à un instant t qui décroît de façon monotone au fil du temps. Les étapes ci-dessus sont répétées jusqu'à atteindre la minimisation d'une erreur globale calculée sur le réseau ou selon un nombre prédéfini d'étapes d'apprentissage.

Parmi les avantages de cette méthode le fait qu'elle réduise l'espace multidimensionnel des données d'entrée, l'analyse est insensible aux valeurs manquantes. Cependant, les conditions d'initialisation du modèle sont l'inconvénient majeur de cette méthode en plus du temps qu'elle consacre pour la construction d'un réseau.

### *II.3.8.3 Avantages et inconvénients du clustering basé sur un modèle*

Le clustering basé sur un modèle a beaucoup d' avantages, [25]:

- Dérive la partition des données à partir d'un modèle statistique estimé, permettant ainsi un regroupement «souple» et des déclarations d'incertitude sur la classification résultante.
- Le choix de la méthode de regroupement devient maintenant un problème de sélection de modèle. Une variété d'outils dérivés de la théorie statistique peuvent aider dans cette tâche.
- Supposons que chaque composant du mélange est un cluster, l'approche basée sur un modèle identifie le nombre de clusters dans les données. D'autres méthodes nécessitent soit des hypothèses a priori (par exemple, k-Means), soit des décisions subjectives (regroupement hiérarchique).
- Peut accueillir plusieurs formes de cluster qui ne sont pas facilement implémentées dans la plupart des méthodes traditionnelles.

Il y a beaucoup de problèmes dans ce type de méthodes, [26]:

- Compacité.
- Les niveaux basés sur la densité.
- Connectivité.
- Similitude fonctionnelle.

## **II.4 Pourquoi formé des clusters ?**

Le clustering dans les RCSFs peut grandement contribuer au passage à l' échelle, à la prolongation de la durée de vie et à l' efficacité énergétique de ces réseaux. Ainsi, le routage hiérarchique est un moyen efficace pour réduire la consommation d' énergie au sein d' un cluster, en effectuant une agrégation des données afin de réduire le nombre de messages redondants transmis à la station de base. Contrairement à un routage à plat qui peut entraîner une surcharge importante (overload) avec l' augmentation de la densité des capteurs. Une telle surcharge peut entraîner une latence dans la communication et un suivi inadéquat des

## Chapitre II : Méthodes de routage et clustering

---

événements. De plus, une architecture basée sur un routage à plat ne permet pas le passage à l' échelle. Le clustering est particulièrement efficace pour les applications qui nécessitent un passage à l' échelle (des centaines ou des milliers de capteurs). Le passage à l' échelle dans ce contexte implique la nécessité d' un équilibrage de charge et d' une utilisation efficace des ressources. Le rapport performance/coût est grand dans le cas des clusters.

### II.5 Conclusion

Les nœuds capteurs composant les réseaux de capteurs sans fils sont très limités en puissance de transmission, en capacité de traitement et de stockage de l' information et en ressources énergétiques. Ainsi, les services et les protocoles développés pour les réseaux de capteurs sans fils, doivent être plus simples et peu gourmands en ressources par rapport à ceux fonctionnant sur les réseaux traditionnels.

Mais il est presque impossible de trouver, pour une tâche définie, un prototype unique de protocole adapté à des scénarios d' applications très différents. Par exemple, les protocoles de routage d' information tournant sur un réseau de capteurs sans fils dédié à une application environnementale diffèrent de ceux développés pour un réseau de capteurs sans fils dédié à une application médicale où la notion de déterminisme et de temps réel sont des facteurs incontournables.

Dans ce chapitre nous avons, de ce fait, présentés les principes et algorithmes de certains protocoles de routages ainsi que les travaux exploités dans des projets de recherche. Nous avons aussi passé en revue les méthodes de clustering en nommons les travaux en relation.

Le clustering a été largement utilisé dans les réseaux de capteurs sans fils et a été introduit la dernière décennie dans les réseaux de capteur sans fils corporels vu l' amélioration des performances du réseau qu' il a apporté selon plusieurs paramètres essentiellement la durée de vie.

Dans le prochain chapitre, nous présentons notre contribution dans l' élaboration d' une nouvelle méthode de routage basée sur le clustering appliquée à un réseau WBAN de paramètres prédéterminés.



**Chapitre III :**

**Protocole**

**Improved-CBF-CM-**  
**simulation et résultats**



### III.1 Introduction

Le réseau corporel sans fil (WBAN) se compose de différents nœuds hétérogènes situés à la surface ou à l'intérieur du corps humain qui communiquent sans fil entre eux pour fournir des informations sur l'environnement détecté [69]. WBAN est appliqué dans différentes applications telles que les soins de santé, la formation militaire, les jeux interactifs, l'authentification sécurisée et d'autres domaines. Dans les applications médicales, les capteurs visent à collecter des informations (par exemple, des données sur le patient) et à les envoyer à un nœud récepteur spécifié. Le nœud récepteur dit sink est le nœud responsable de la collecte des informations des nœuds capteurs. Ensuite, il l'enverra au centre de santé. L'atteinte du sink peut se faire directement ou indirectement via des nœuds relais.

Par conséquent, le protocole ou l'algorithme de routage sélectionné joue un rôle essentiel dans le processus de conception de réseaux WBANs efficaces, fiables et à faible coût. Pour cela, nous avons utilisé l'outil Matlab dans le but d'étudier et d'analyser un nouveau protocole de routage basé sur le clustering que nous avons appelé « Improved CBFCM » afin d'évaluer les performances du réseau WBAN dans lequel il a été appliqué.

On voit que le protocole de routage joue un rôle essentiel dans le processus de conception de tous les réseaux de capteurs corporels sans fil efficaces, fiables et à faible coût.

Dans ce dernier chapitre nous commençons par présenter certains travaux récemment effectués dans ce sens, pour poursuivre avec les différentes étapes de l'implémentation du protocole de routage adopté dans notre contribution. Nous continuons avec une comparaison des performances du WBAN (durée de vie, stabilité, l'efficacité énergétique) obtenus par ce protocole, celui de la transmission directe et celui basé sur la méthode FCM classique. Pour cela une présentation détaillée des résultats obtenus par les trois méthodes ainsi qu'une discussion de ces résultats est faite. Nous terminons par une conclusion est les perspectives de notre travail.

### III.2 Travaux récents

Ces dernières années, le monde a connu de nombreuses expériences dans le domaine du BAN, chaque expérience cherche à découvrir le meilleur moyen de préserver l'énergie des capteurs et de prolonger la durée de vie du réseau par différentes méthodes.

Dernièrement, les problèmes de routage du WBAN ont suscité un grand intérêt et de nombreux protocoles sont proposés basé sur, les clusters, la posture, la température, etc. [69] Nous nous sommes intéressés spécialement aux travaux effectués sur les protocoles de routage basés sur le clustering.

Un premier travail récent est fait par Akash & co. [71], le but des auteurs été la conception d' un réseau WBAN énergiquement efficace où un nœud passerelle est utilisé dans un chemin de routage parmi les clusters du corps, protocole *GNCH* ' *Gateway Node-based Clustering Hierarchy*'. L' architecture WBAN adoptée dans cette étude est de 16 nœuds capteurs et 1 nœud sink. Ce protocole a permis la minimisation de la consommation d' énergie et par conséquent a augmenté la durée de vie du WBAN.

Une autre étude d' Ullah & co. [72], consiste à utiliser un clustering basé sur la connaissance préalable de l' énergie récupérée au niveau des nœuds en même temps qu' un protocole de routage coopératif pour WBAN, protocole *E-HARP* ' *Energy-efficient Harvested-Aware clustering and cooperative Routing Protocol*'. Le système WBAN proposé se compose de 14 nœuds capteurs et 2 nœuds sink. Les résultats acquis ont montré une amélioration significative d'E-HARP en termes de stabilité et de durée de vie du réseau, de débit, de délai de bout en bout et de taux de livraison de paquets.

Une autre étude de Rakhee & al [73] a permis d' analyser les performances cette fois ci au niveau de la station de base en prenant en considération le type de données reçues de capteurs corporels hétérogènes et où la technique de clustering a été utilisée, pour améliorer l'efficacité des services de santé.

### III.3 Contributions et protocoles proposés

Suite à ces récentes études réalisées sur les techniques de routage et de clustering existantes ainsi que l'état de l'art présenté dans le deuxième chapitre, nous allons proposer un nouveau protocole de routage qui permet de satisfaire plusieurs critères de performances d'un WBAN sous la contrainte imposée d'une ressource d'énergie limitée.

Notre première contribution est de concevoir un protocole de routage basé sur le clustering par la méthode Fuzzy C-Means et une sélection du Cluster Head basée sur l'énergie résiduelle que nous avons noté *CBFCM* pour '*Clustering Based Fuzzy C-Means*' .

Notre deuxième contribution est une amélioration du protocole proposé précédemment, qui consiste à supprimer les nœuds proches du sink de la phase de clustering. Cet autre protocole est nommé *Improved CBFCM*.

Les performances de l'algorithme de routage proposé sont présentées et mesurées selon les critères de performances suivants :

1. Durée de vie du réseau,
2. stabilité du réseau
3. énergie résiduelle.

### III.4 Outils de simulation

Plusieurs outils de simulation existent et sont applicables pour les réseaux de capteurs sans fil, nous présentons certains :

- ✓ NS-2 et NS-3,
- ✓ OMNET++,
- ✓ Castalia
  
- ✓ MATLAB...

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

---

Nous avons choisi MATLAB Simulator, car il dispose d' une large bibliothèque de fonctions en particulier celles qui manipulent les vecteurs et les matrices ainsi que certaines méthodes préprogrammée tel que la FCM.

### III.5 Algorithme FCM (Fuzzy C-Means)

Dans ce qui suit, nous allons considérer l' algorithme FCM adopté pour la formation des clusters et essayer de le décrire.

Fuzzy C-means (FCM) est une technique de clustering de données dans laquelle elle utilise un critère de minimisation des distances intra-clusters et maximise les distances inter-clusters, mais délivre un degré d' appartenance à chaque cluster pour chaque nœud. Chaque point de données appartient à un cluster à un certain degré qui est spécifié par une note d'appartenance. Cette technique a été introduite à l'origine par Jim Bezdek en 1981 [18] en tant qu'amélioration des méthodes de clustering antérieures. Il fournit une méthode permettant de regrouper des points de données qui peuplent un espace multidimensionnel dans un nombre spécifique de clusters différents. Le principal avantage de FCM est qu'elle permet des appartenances graduelles de points de données à des clusters mesurés en degrés dans l' intervalle [0,1]. Cela donne la flexibilité d'exprimer que les points de données peuvent appartenir à plus d'un cluster. Il est basé sur la minimisation de la fonction objectif 3.1 suivante :

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (3.1)$$

$$1 < m < \infty$$

Où  $m$  est un nombre réel supérieur à 1,  $u_{ij}$  est le degré d'appartenance de  $x_i$  au cluster  $j$ ,  $x_i$  est le  $i$ ème des données mesurées de dimension  $d$ ,  $c_j$  est le centre de dimension  $d$  du cluster, et  $\|*\|$  est n'importe quelle norme exprimant la similitude entre toutes les données mesurées et le centre. Le partitionnement flou est réalisé par une optimisation itérative de la fonction objectif montrée ci-dessus, avec la mise à jour de l'appartenance  $u_{ij}$  et des centres de cluster  $c_j$  par :

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m} \quad (3.2)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left( \frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3.3)$$

Cette itération s'arrêtera lorsque

$$\max_{ij} \{ |U_{ij}^{(k+1)} - U_{ij}^k| \} < E \quad (3.4)$$

Où E est un critère de terminaison compris entre 0 et 1, alors que k est les pas d'itération. Cette procédure converge vers un minimum local ou un point selle de  $J_m$ .

L'algorithme formel est :

1. Initialiser la matrice  $U = [U_{ij}], U^{(0)}$
  2. Au pas k : calculer les vecteurs centres  $C^{(k)} = [c_j]$  avec  $U^{(k)}$
  3. Mettre à jour  $U^{(k)}, U^{(k+1)}$
- Si  $\|U^{(k+1)} - U^{(k)}\| < E$  puis STOP ; sinon retournez à l'étape 2.

### III.6 Modèle WBAN utilisé

#### III.6.1 Déploiement des nœuds

Le système WBAN adopté est celui proposé par [72]. Il se compose de 14 nœuds homogènes (SN, Sensor Node) ayant des ressources matérielles limitées en raison de leur petite taille. Ces nœuds sont déployés dans la face avant du corps humain, sont du même type, avec deux nœuds récepteurs (sink).

On considère que ces nœuds sont placés sur la peau humaine. Les deux sink sont des nœuds perfectionnés dotés d'une matérielle haute performance par rapport aux nœuds ordinaires. Les nœuds sont placés à différents endroits du corps humain, comme la montre la figure 3.1 et leurs détails sont mentionnés dans le tableau 3.1.

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

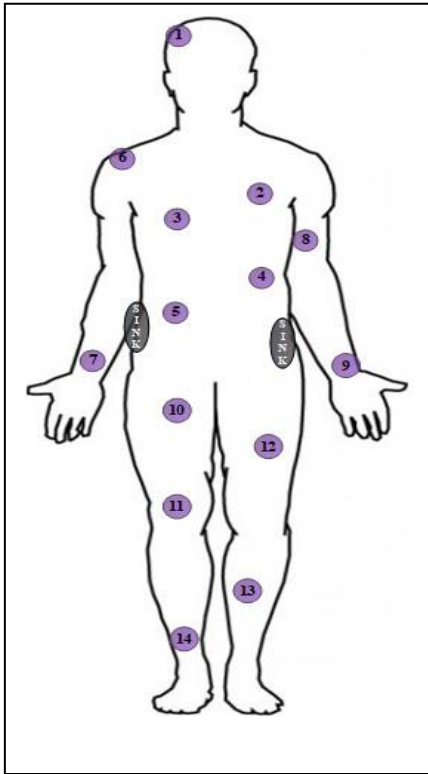


Figure 3.1 Localisation des nœuds

Nœuds	Axis X (m)	Axis Y (m)
1	0.32	1.77
2	0.35	1.37
3	0.22	1.35
4	0.36	1.01
5	0.35	0.01
6	0.08	1.45
7	0.06	0.98
8	0.37	1.27
9	0.4	1.01
10	0.22	0.91
11	0.45	0.45
12	0.15	0.5
13	0.15	0.45
14	0.25	0.17
Sink 1	0.3	1.03
Sink 2	0.09	1.05

Tableau 3.1 positions des nœuds selon les axes X et Y

### III.6.2 Scénario de routage entre nœuds

Selon le déploiement déterministe des nœuds, la communication directe à saut unique est effectuée dans les cas suivants :

- 1) si le nœud de détection est plus proche du nœud récepteur.
- 2) Si le nœud du capteur est un CH sélectionné
- 3) si les données détectées sont critiques.

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

---

Autrement, les SNs transmettent leurs données d'abord au CH, qui après avoir reçu les données, les agrègent puis les transmettent au sink selon une communication multi-sauts.

### III.6.3 Modèle énergétique

- 1) La distance entre les SN et le sink est calculée par la distance euclidienne, qui est exprimée dans l'équation (3.5).

$$D(i, j) = \sqrt{[X_i - X_j]^2 + [Y_i - Y_j]^2} \quad (3.5)$$

Où  $(X_i, Y_i)$  représentent les coordonnées d' un nœud ' SN' et  $(X_j, Y_j)$  les coordonnées du sink/CH.

- 2) Le modèle de propagation du path-loss sur le corps humain utilisé est présenté par l' équation (3.6). C' est le même que celui utilisé dans le projet *IEEE 802.15.6* pour la modélisation du canal BAN [71].

$$P_{Loss} (dB) = \alpha \times \log_{10}(D) + \beta \log_{10}(f) + N_{df} \quad (3.6)$$

Avec:

$D$ : distance euclidienne nœud-sink

$f$ : la fréquence de travail (2.4 GHz)

$N_{df}$  : variable de distribution (158 dB)

Les coefficients linéaire  $\alpha = -27,6$ ,  $\beta = -46,5$

- 3) L'estimation de la consommation d'énergie durant la transmission, réception et traitement de données est faite selon le modèle radio du 1<sup>er</sup> ordre dont voici les équations [71][72].

Energie consommée durant la transmission de K bits à une destination D d' un nœud :

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

---

$$E_{TX}(K, D) = E_{TX\ elect} \times K + E_{Amp} \times n \times K \times D \quad (3.7)$$

Energie consommée lors de la réception de K bits :

$$E_{RX}(K) = E_{RX\ elect} \times K \quad (3.8)$$

Energie consommée durant l'agrégation des données faite par le CH :

$$E_{D-Aggre}(K) = E_{DA} \times K \quad (3.9)$$

Avec :

$K$  : nombre de bits

$E_{TX\ elec}$  : énergie consommée par l'unité de transmission du SN

$E_{Amp}$  : énergie consommée par l'unité de réception du SN

$E_{RX\ elec}$  : énergie consommée par le circuit d'amplification

$E_{D-aggre}$  : énergie consommée lors de l'agrégation

$D$  : la distance entre nœud et CH ou CH et sink

$n$  : path-loss d'un corps humain

Et où toutes les énergies sont exprimées en (Joule/bit)

- 4) L'énergie des SNs est consommée durant les différentes opérations de collecte, agrégation/traitement, transmission et réception des données. L'estimation de la perte d'énergie totale de tous les membres d'un cluster peut être exprimée à l'aide de l'équation (3.10) [71].



$$E_{c-membre}(i) = \sum_{j=1}^N \{E_{Amp} \times n \times K \times D(i, j) + E_{TX} \times K\} \quad (3.10)$$

Où  $E_{c-membre}(i)$  est la perte d'énergie totale estimée d'un membre  $i$  d'un cluster, et  $N$  étant le nombre total de SNs dans le réseau.

Sachant qu'une valeur minimale de  $E_{c-membre}$  représente la meilleure connectivité avec les nœuds voisins.

- 5) Après l'estimation de la perte d'énergie de tous les membres du cluster, Le SN se considère comme un CH de ce cluster et calcule ensuite la perte d'énergie s'il reçoit les données de tous ses membres de cluster, les agrège et les transmet au nœud récepteur. La perte d'énergie estimée à partir de l'énergie actuelle du SN est exprimée à l'aide de l'équation (3.11) ci-dessous :

$$E_{Loss-SN}(i) = (E_{Tx} + E_{D-Aggre}) \times K + E_{Amp} \times n \times K \times D(i, sink) + (N - 1) \times E_{Rx} \times K \quad (3.11)$$

Avec:

$E_{Loss-SN}(i)$ : la perte d'énergie totale estimée du SN considéré (ou candidat CH)

$E_{D-Aggre}$  énergie d'agrégation négligeable.

La valeur la plus faible d' $E_{Loss-SN}(i)$  représente la meilleure proximité des SNs au nœud sink.

- 6) La somme des deux pertes d'énergie (éq. 3.10 & 3.11) représente la perte totale d'énergie du réseau, exprimée dans l'équation (3.12),  $E_{Total-loss}(i)$  pour le SN  $i$  :

$$E_{Total-loss}(i) = E_{c-membre}(i) + E_{Loss-SN}(i) \quad (3.12)$$

### III.7 Implémentation de protocoles de routage

Pour l'expérimentation du protocole de routage proposé dans ce travail l'*Improved CBFCM*, et l'évaluation de ces performances nous avons implémenté différents programmes

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

avec le logiciel de programmation Matlab. Pour ce faire voici les informations détaillées des paramètres de simulation utilisés, tels que l'énergie initiale fournie à tous les SN, la zone de simulation, le nombre de nœuds déployés et leurs positions, etc. présentées dans le tableau 3.2.

PARAMETRES	VALEURS
Zone de simulation	$1 \times 2 \text{ m}^2$
Nombre de nœuds capteur	14
Nombre de sink	2
Positions des nœuds capteurs et des sink	indiqués dans le tableau 3.1
$E_{\text{Initiale}}$	0.5 J
$E_{\text{Tx-électronique}}$	$16.7\text{e-}9 \text{ J/bit}$
$E_{\text{Rx-électronique}}$	$36.1\text{e-}9 \text{ J/bit}$
$E_{\text{Amplificateur}}$	$1.98\text{e-}9 \text{ J/bit}$
La fréquence de travail	2.4 GHz
Nombre maximum de bits	3000

**Tableau 3.2** Paramètres de simulation

L' énergie d' agrégation des données consommée par nœud est négligeable.

Notre simulation s' est déroulée en deux phases :

### **Phase 1 (clustering):**

- Déploiement des différents nœuds SNs et sink
- Formation des clusters et indication de leurs centroides en utilisant la méthode de clustering basée sur FCM

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

---

- Sélection des Cluster heads (CHs) en fonction de l' énergie résiduelle des membres du cluster

### **Phase 2 (Routage):**

- Communication des données entre les SNs et le CH.
- Communication des données du CH vers le sink le plus proche.

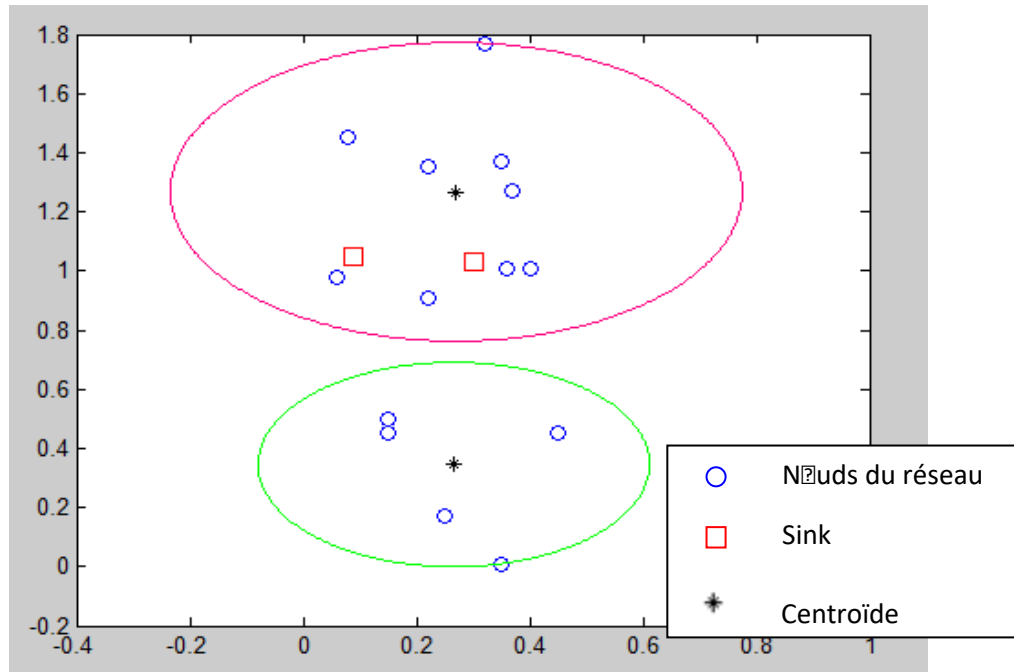
### **III.7.1 Routage CBFCM**

Une première approche pour la transmission des données est d' utiliser le protocole de routage basé sur le clustering en utilisant la méthode FCM noté ici par **CBFCM** (*Clustering based FCM*). Ce protocole de routage est réalisé en plusieurs étapes :

- **Déploiement des nœuds** : La topologie WBAN adoptée comporte 14 SN et 2 sink (figure 3.2). Le positionnement de ces nœuds se fait en fonction des positions indiquées dans la figure 3.1 et le tableau 3.1.
- **Formation des clusters** : Le but pour la création de clusters et de faciliter la convergence du réseau et le processus de transmission des données puisque uniquement les membres d' un cluster communique à l' intérieur de celui ci.

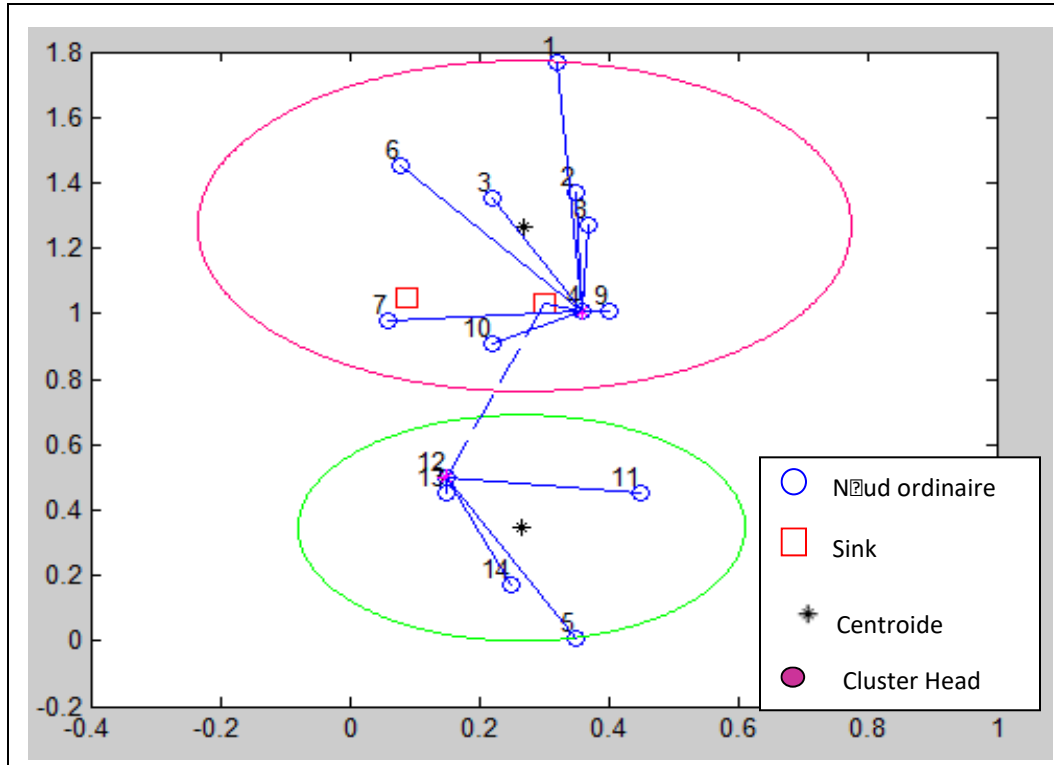
Le clustering basé sur la méthode FCM a été utilisé. Cette méthode nécessite l' appel de la fonction ' *fcm* ' existante dans la bibliothèque des fonctions de MATLAB avec la déclaration préalable du nombre de cluster à utiliser  $nc = 2$  (ici un cluster qui regroupe les SNs de la partie supérieure du corps et un deuxième pour les SNs de la partie inférieure) ainsi que les coordonnées des différents nœuds.

L' implémentation de la méthode *fcm* nous renvoie le centre de chaque cluster puis un calcul de la distance maximale permet le tracé des cercles (figure 3.2).



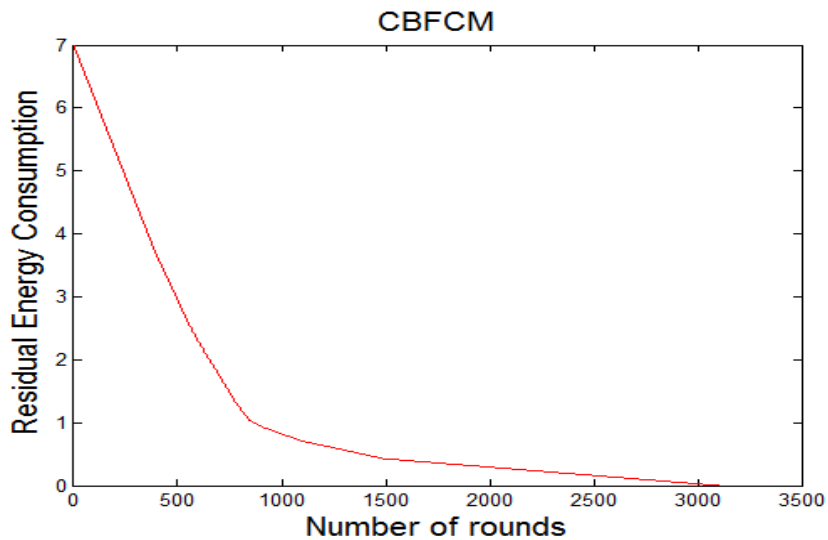
**Figure 3.2** Déploiement des nœuds et centroïdes des clusters

- **Sélection du Cluster Head** : Le choix du Cluster Head dans la première itération est fait sur la base de la proximité du nœud par rapport au sink, le nœud le plus proche au sink dans le cluster est pris comme premier CH (nœud 4 et 12 sur la figure 3.3), et dans la suite des itérations le choix du CH est en fonction du nœud dont l' énergie résiduelle totale consommée est la plus grande dans le cluster (figure 3.3).
- **Transmission des données** : Après la sélection du CH, les nœuds membres d' un même cluster doivent donc transmettre leurs données d' abord au CH sélectionné et ce dernier se chargera de faire le traitement puis de les transmettre au sink qui lui ai le plus proche (figure 3.3). Une communication à saut unique est adoptée.



**Figure 3.3** Transmission par CBFCM (nœuds 4 et 12 premiers CH)

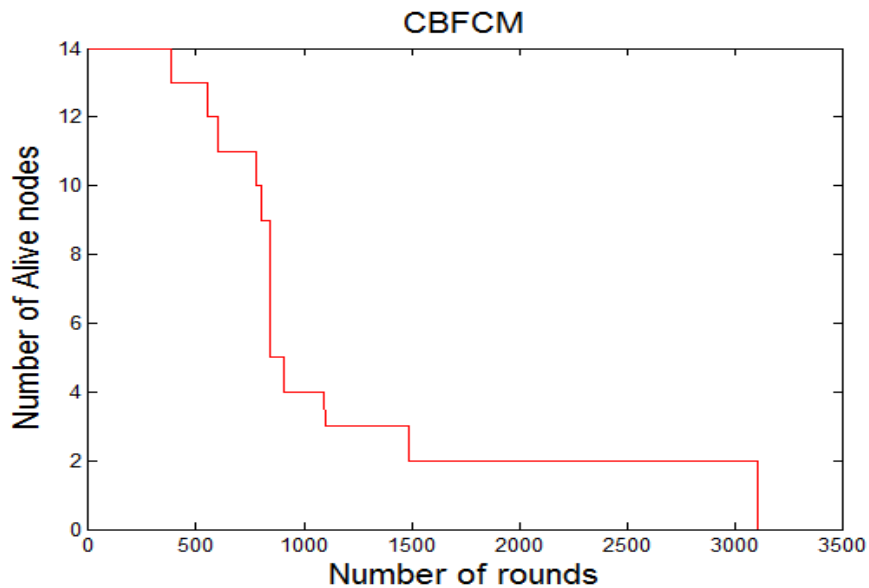
Une fois l'implémentation du protocole CBFCM faite, nous avons testé ces performances du point de vue « énergie résiduelle consommée » et « nombre de nœuds vivants », voici ce que nous avons obtenus comme résultats



**Figure 3.4** Energie résiduelle consommée par CBFCM

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

Sur la figure 3.4 est représentée la courbe de l' énergie résiduelle consommée dans tout le réseau (en Joule/bit) en fonction du nombre de round avec un routage CBFCM. On constate que cette énergie devient nulle au round 3109.



**Figure 3.5** nombre de nœuds vivants avec le protocole CBFCM

Sur la figure 3.5 on voit bien la diminution graduelle du nombre de nœuds vivants en fonction de l' augmentation du nombre de round, jusqu' à ce que le dernier nœud épuise son énergie au round 3109 et provoque ainsi la mort de tout le réseau.

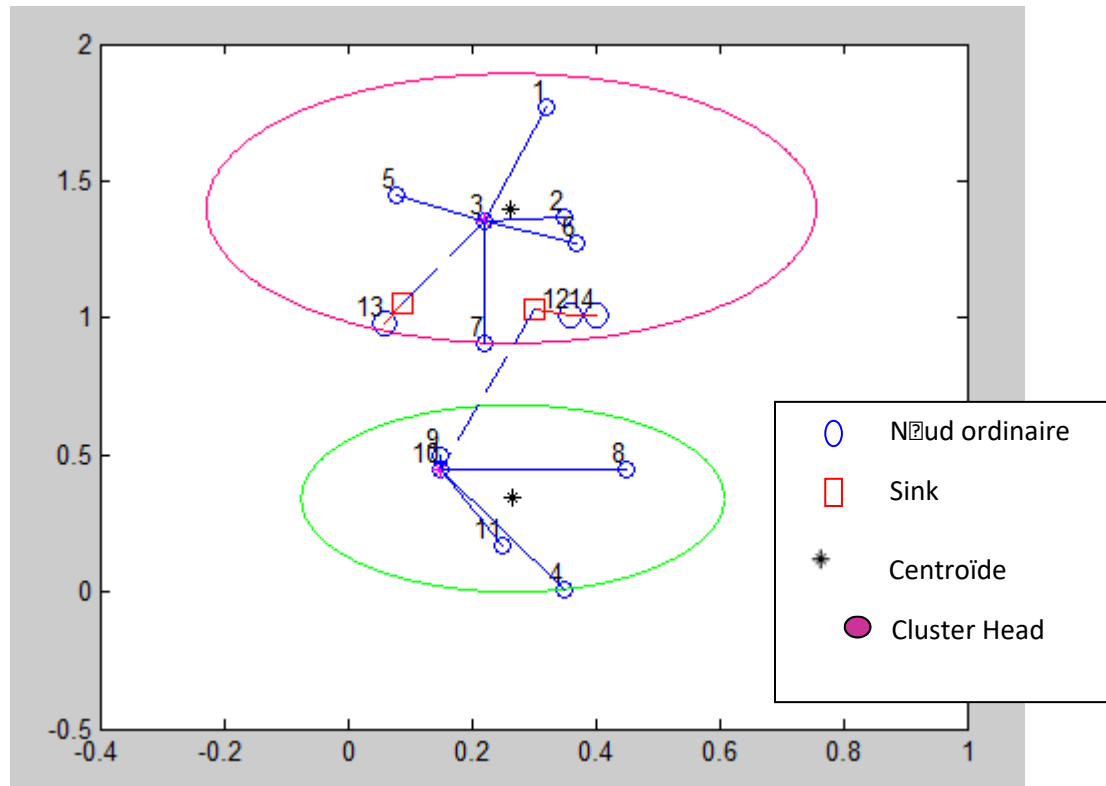
### III.7.2 Routage *improved CBFCM*

Une deuxième approche de routage nommé *improved CBFCM* (*CBFCM amélioré*), une amélioration de celui vu dans la section précédente, est implémentée sous Matlab afin de tester ses performances.

- Le **déploiement du réseau WBAN** est le même, la position des nœuds étant prédéterminé, on a remarqué que 3 nœuds sont très proches des deux sink et donc peuvent leur transmettre directement les données. Nous avons commencé par éliminer ces nœuds (nœuds 12, 13 et 14) de l' étape de clustering en réduisant le vecteur des coordonnées à seulement 11 SNs (figure 3.6).
- L' étape de **formation de cluster** est toujours assurée par la méthode FCM sur les 11 SNs, et elle renvoie deux clusters avec leur centroides.

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

- Le *choix du Cluster Head* dans la première itération est fait sur la base de la proximité du nœud par rapport au centroïde généré par FCM, le nœud le plus proche au centroïde est pris comme premier CH (figure 3.6), et dans la suite des itérations le choix du CH est en fonction du nœud dont l' énergie résiduelle consommée totale est la plus grande dans le cluster.



- Le scénario de *Transmission des données* se fait soit en utilisant une transmission multi-sauts ou à saut unique selon que les données soient collectées par un CH ou directement transmises au sink (figure 3.6).

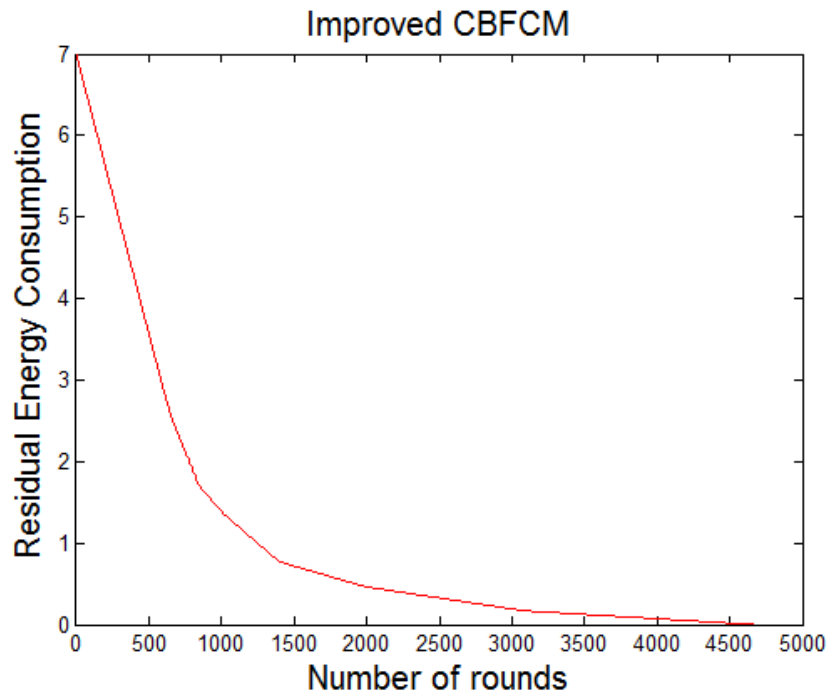
La transmission de données des nœuds privés du clustering se fait comme suit :

- Le nœud 14 transmet au nœud 12 qui va lui-même transmettre au sink le plus proche.
- Le nœud 13 va directement transmettre ces données au 2ème sink le plus proche.

Les autres nœuds doivent donc transmettre leurs données d'abord au CH sélectionné et ce dernier se chargera de faire le traitement puis de les transmettre au sink.

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

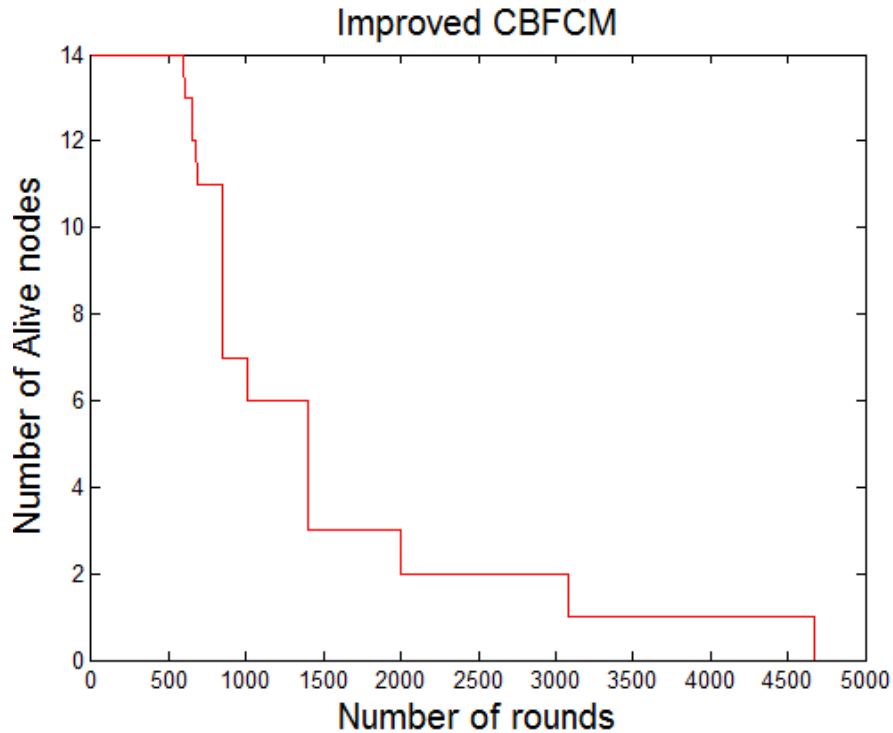
Une fois l'implémentation terminée du protocole de routage *improved CBFCM*, les mêmes performances sont analysées dont voici le résultat.



**Figure 3.7** Energie résiduelle consommée par improved\_CBFCM

Sur la figure 3.7 est représentée la courbe de l'énergie résiduelle consommée dans tout le réseau (en Joule/bit) en fonction du nombre de round par un routage *improved CBFCM*. On constate que cette énergie devient nulle au round 4672.





**Figure 3.8** Nombre de nœuds vivants avec le protocole improved\_CBFCM

Sur la figure 3.8 Le dernier nœud meurt au round 4672 et provoque la mort de tout le réseau.

### III.7.3 Transmission par routage direct

Dans ce protocole de routage avec transmission direct de données, la distance euclidienne est prise comme paramètre de décision. Les nœuds font une transmission de leurs données directement vers l' un des deux sink.

Nous avons calculé la distance entre chaque nœud de notre réseau WBAN et les 2 sink existants, une comparaison est ensuite effectuée entre les deux valeurs trouvées pour décider en fonction de la plus petite une transmission vers le sink concerné.

Sur la figure 3.9, sont représentés les chemins empruntés par les SNs pour la transmission de leurs données directement au sink le plus proche.

L' énergie résiduelle consommée dans l' ensemble du réseau utilisant ce protocole « Direct Transmission » est représentée dans la figure 3.10.

## Chapitre III : Protocole Improved-CBF-CM-simulation et résultats

L' autre critère « nombre de nœuds vivants » est représenté sur la figure 3.11 en fonction du nombre de round (itérations).

Ces deux dernières figures montrent qu' au round 3517 l' énergie résiduelle du réseau s' annule ainsi que le dernier nœud vivant qui meurt.

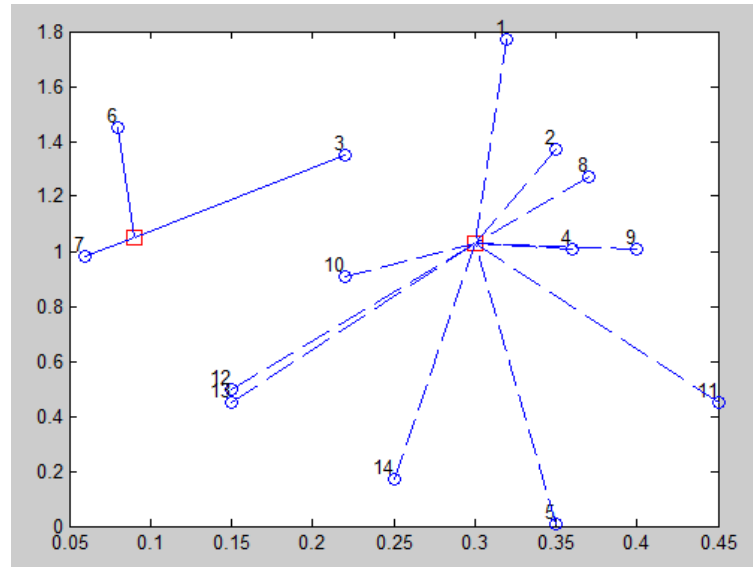


Figure 3.9 Transmission directe au sink

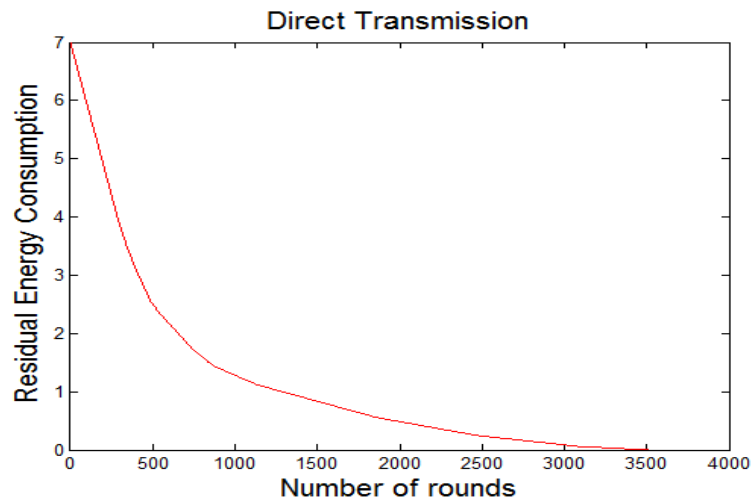
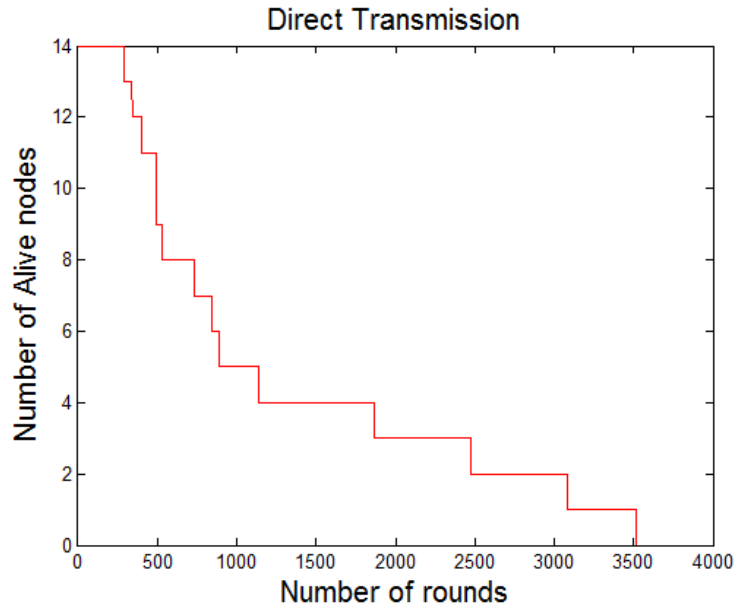


Figure 3.10 Energie résiduelle consommée en transmission directe



**Figure 3.11** Nombre de nœuds vivants en transmission directe

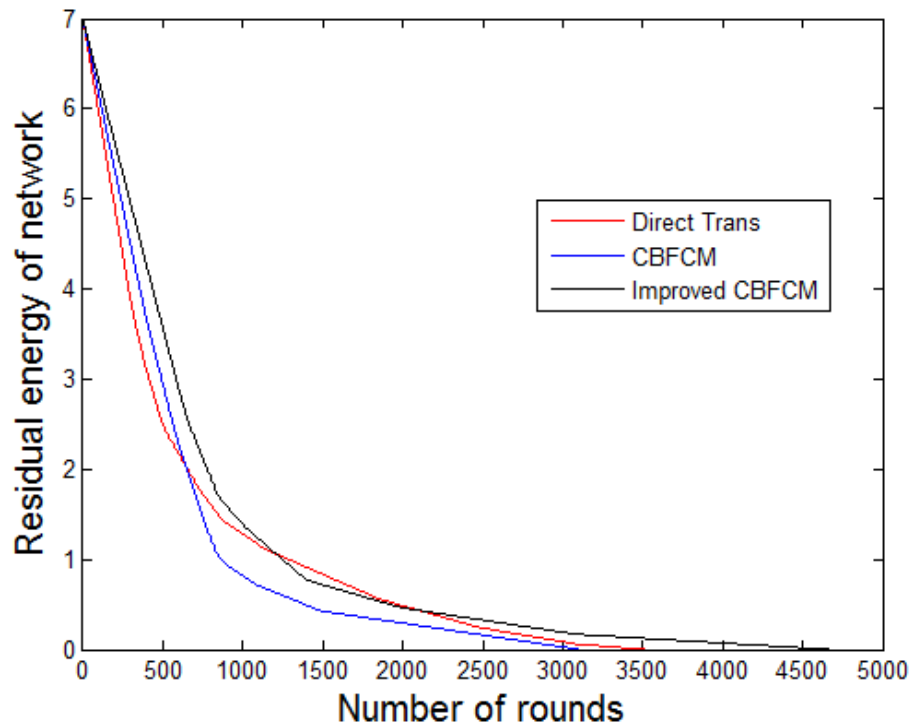
### III.8 Comparaison et évaluation du protocole proposé

Le protocole *improved CBFCM* proposé est comparé aux deux autres protocoles, CBFCM et transmission directe, en termes de durée de vie du réseau, consommation totale de l' énergie résiduelle et la stabilité du réseau.

Pour cela, nous avons regroupé les courbes des énergies résiduelles consommées ainsi que celles du nombre de nœuds vivants en fonction du nombre de rounds, obtenues par les trois protocoles de routages, afin de montrer l' amélioration apportée par le protocole *improved CBFCM*.

#### III.8.1 Energie résiduelle

L'énergie résiduelle totale du réseau fait référence à la somme de l'énergie actuelle/restante de tous les SN du réseau. L'énergie est consommée par différentes opérations effectuées dans le SN, transmission et réception des données.

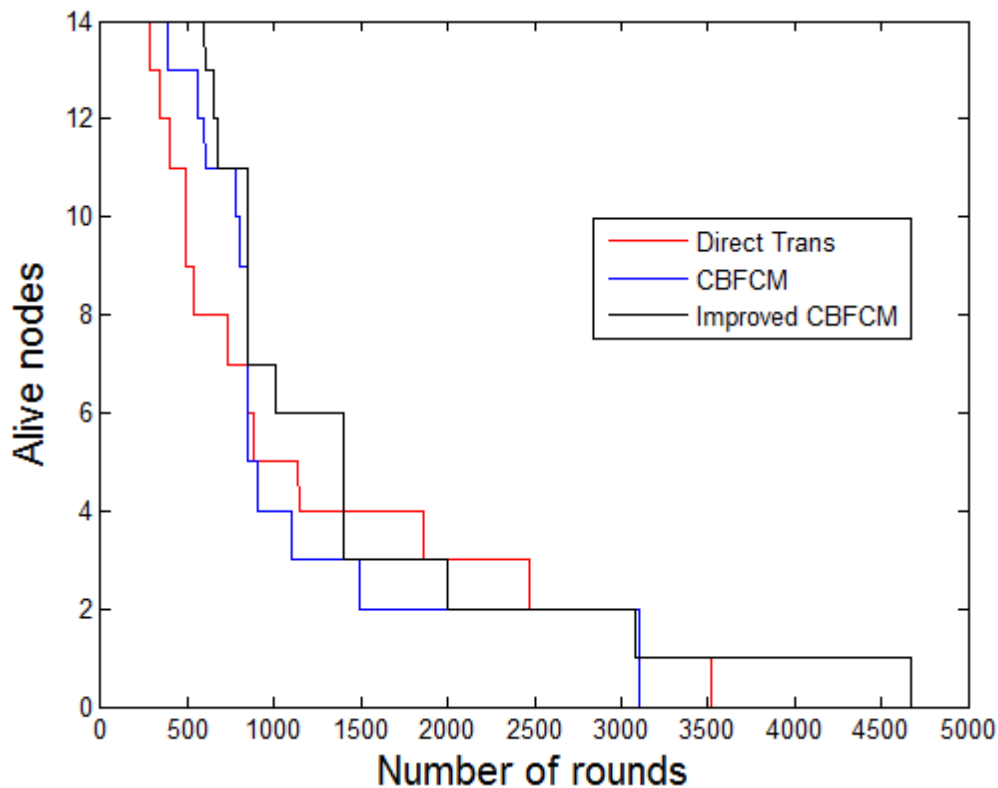


**Figure 3.12** Comparaison des énergies résiduelles consommées par les 3 méthodes

Nous constatons que le protocole Improved CBFCM est meilleur que les deux autres car c' est le dernier à consommer l'énergie résiduelle totale du réseau, plus de 4600 tours, en raison de la bonne répartition de la consommation d' énergie pendant la durée de vie du réseau.

### III.8.2 Durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau fait référence au temps de travail total de tout réseau. Le temps commence à partir du déploiement de tous les nœuds jusqu'à leur mort. C'est l'une des principales caractéristiques de performance des réseaux de capteurs où les nœuds fonctionnent sur batterie.



**Figure 3.13** Comparaison du nombre de nœuds vivants pour les 3 méthodes

Si on compare les rounds au quels les derniers nœuds meurent dans la transmission direct et celle basée sur le protocole CBFCM, on trouve 3517 et 3109 respectivement. Ici la transmission directe a améliorée la durée de vie du réseau car en utilisant le clustering, basé sur le FCM, certains nœuds (les CHs) consomme plus d' énergie vu qu' ils ont deux fonctions : celle de traitement des données reçues à partir des nœuds membres de leur cluster et celle de leurs transmission au nœud sink.

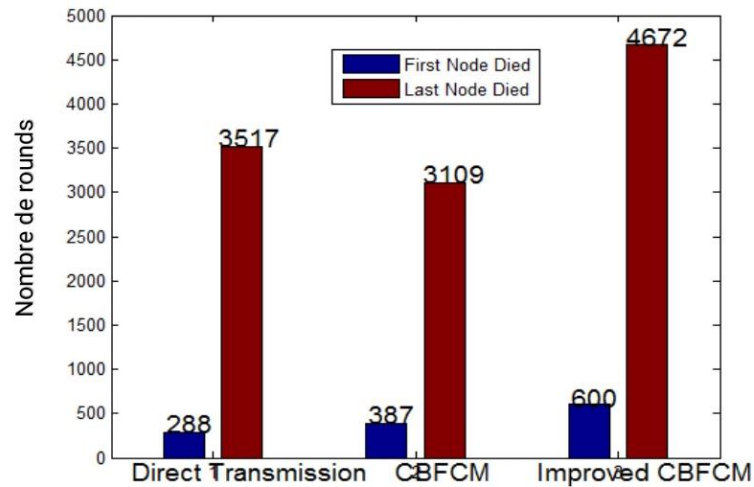
Par contre le protocole Improved CBFCM a nettement amélioré la durée de vie du réseau avec le dernier nœud qui meurt au 4672<sup>ième</sup> round.

### III.8.3 Stabilité du réseau

Il s'agit de la période/temps avant la mort du premier SN du réseau. Les SNs dans les réseaux ayant une meilleure période de stabilité, vivent plus longtemps.

## Chapitre III : Protocole Improved-CBFCM-simulation et résultats

Nous présentons ici un résumé des résultats sous forme d'histogramme, obtenus des trois protocoles de routages adoptés, concernant l'ordre du round dans le quel le premier nœud meurt ou le dernier nœud qui meurt.



**Figure 3.14** Round du premier et dernier nœud qui meurt pour chacune des 3 méthodes

Le premier nœud du protocole *improved CBFCM* meurt au 600ème round. Alors que le premier nœud de CBFCM et DIRECT meurt aux 387 et 288 round respectivement. Cela atteste que le protocole de routage *improved CBFCM* atteint une période de stabilité élevée par rapport aux deux autres protocoles (le double). Les performances améliorées d' *improved CBFCM* en termes de stabilité élevée du réseau sont dues à la présence des nœuds qui envoient directement au sink par rapport au CBFCM normal.

### III.9 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude qui a fourni une évaluation des performances d'un protocole de routage coopératif pour WBAN basé sur le clustering, l' *improved CBFCM* en comparaison avec un protocole de transmission directe et celui basé sur la méthode FCM de clustering, *CBFCM*.

## **Chapitre III : Protocole Improved-CBF-CM-simulation et résultats**

---

Ce protocole propose principalement deux mécanismes pour améliorer les performances des WBAN, à savoir la sélection dynamique du CH parmi les membres du cluster et le principe des nœuds à proximité des puits qui leur envoient directement les données collectées. Cette nouvelle approche efficace a permis de réduire la consommation d'énergie résiduelle, d'améliorer la stabilité du réseau et augmenter sa durée de vie.

Au cours des travaux à venir, il est nécessaire de poursuivre les recherches sur le routage WBAN afin d'offrir de meilleures performances que celles obtenues et garantir des résultats plus stables pour l'utilisation du WBAN dans les applications de santé.

# **Conclusion Générale**



## Conclusion générale

Les réseaux corporels sans fil (WBANs) sont des applications efficaces des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), principalement conçu pour interconnecter le corps humain avec des capteurs. Le WBAN est l'une des solutions prometteuses pour les applications médicales où des nœuds capteurs peuvent être placés sur ou à l'intérieur d'un corps humain, utilisant une communication sans fil entre eux, afin de fournir des informations précises sur la santé du patient. Le progrès dans la nanotechnologie a permis la réduction de la taille de ces capteurs et par conséquent celle de leurs batteries.

Dans les applications médicales, les capteurs visent à collecter des informations et à les envoyer à un nœud sink. Le nœud sink est le nœud responsable de la collecte des informations des autres nœuds capteurs, pour les envoyer au centre de santé. L'atteinte du nœud sink peut se faire directement ou indirectement via des nœuds intermédiaires.

L' énergie consommée par ces nœuds s' achèvera après une période de temps, de tel sorte qu' il devienne nécessaire de remplacer ou recharger ses batteries, chose qui n' est pas possible pour certains capteurs ou que sa demande une chirurgie donc un coût plus élevé. Pour cela, nous avons besoin de techniques appropriées qui conduisent à une moindre consommation d' énergie et procurent une longue durée de vie des capteurs WBAN.

Différents protocoles de routage sont étudiés et proposés afin de faciliter le WBAN. Le protocole ou l'algorithme de routage sélectionné est le facteur clé pour atteindre des performances souhaitables.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception sous le logiciel Matlab d' un protocole de routage énergiquement efficace à base de cluster ' *Improved CBFCM* ' destiné aux WBANs. L' implémentation de ce protocole de routage et la comparaison faite avec deux autres techniques nous permet de dire que nous avons obtenus des résultats satisfaisant selon les critères de performance d' un réseau WBAN, à savoir, l' énergie résiduelle consommée, la stabilité du réseau en rapport avec le premier nœud mort du réseau ainsi que la durée de vie du réseau WBAN estimée au dernier nœud qui meurt dans le réseau.

Une analyse des résultats obtenus permet d' énoncer les points suivants :

- ✓ Sachant que le WBAN est un réseau à petite zone ceci nous a permis d' obtenir de meilleurs résultats
- ✓ La transmission multi sauts a été éliminée à l' intérieur d' un cluster en introduisant le clustering FCM dans le WBAN.
- ✓ L' approche de clustering a réduit effectivement le nombre de sauts requis pour que les données atteignent un des sink à partir des nœuds sources.
- ✓ La combinaison d' une transmission à saut unique (à l' intérieur d' un même cluster) et celle à multi sauts (entre les nœuds exclus du clustering) procure une meilleure efficacité énergétique.
- ✓ Le choix dynamique du CH a permis d' équilibrer l' énergie globale du réseau WBAN.
- ✓ L' utilisation de deux sink aide à couvrir le problème de perte de chemin et équilibre également la charge du réseau.

En perspectives, nous proposons comme amélioration de ce travail l' utilisation de protocoles de routage avec des méthodes de clustering hybride, plus compliqués mais plus efficaces, aussi une technique de récupération d'énergie qui fournit en permanence de l'énergie aux nœuds, générée à partir de l'environnement humain (énergie solaire), afin d'améliorer la durée de vie et la stabilité du réseau dans WBAN.

## Références

- [1] Mohamed BENAZZOUZ, «Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil » Ecole nationale supérieure d'informatique Oued- Smar Alger Algérie - magistère IRM 2013.
- [2] C.-T. Kone, "Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension," Université Henri Poincaré-Nancy I, 2011.
- [3] M. Lehsaini, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs: application à la domotique," Besançon, 2009.
- [4] <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/SensorNetworkMuseum>.
- [5] Wilson J. S. Sensor technology handbook. Amsterdam, Elsevier. P 22-23. 2004.
- [6] Bouabdellah K., « Problématique de la consommation de l' énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Séminaire LIUPPA, Université de Pau et des Pays de l' Adour, 14 Octobre 2007.
- [7] [http://www.tafats.fr/Techniques/Reseaux\\_de\\_capteurs/Reseaux\\_capteur\\_text.html](http://www.tafats.fr/Techniques/Reseaux_de_capteurs/Reseaux_capteur_text.html)
- [8] A. Mehiaoui, "Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil."
- [9] O. Boudaa, "Conception et réalisation d' un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil," Université A/Mira de Bejaia, 2015.
- [10] S. MOAD, "Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil" Master recherche en 2ème année informatique, vol. Université : FSIC-Rennes 1, Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA, 2008.
- [11] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks," in ipdps, , p. 0195b: Citeseer. 2002.
- [12] O. Hassan, S. Krit, M. Kabrane, K. Bandaoud, M. Elaskri, K. Karimi, H. Elbousty, and L. Elmaimouni, "Energy Efficient in Wireless Sensor Networks Using Cluster-Based Approach Routing," International Journal of Sensors and Sensor Networks, vol. 5, no. 5-1, pp. 6– 12, 2017

- [13] Kabou Salaheddine, « Etat de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil», Université de Béchar, Juin 2010.
- [14] Mo Li et Yunhao Li, «Underground structure monitoring with wireless sensor net-works», (2007).
- [15] W. Itani, A. Kayssi, and A. Chehab, “ Wireless body sensor networks: Security,privacy, and energy efficiency in the era of cloud computing,” International Journal of Reliable and Quality E-Healthcare, vol. 5, no. 2, pp. 1– 30, 2016
- [16] R. Miramontes, R. Aquino, A. Flores, G. Rodríguez, R. Anguiano, A. Ríos, and A. Edwards, “ PlaIMoS: A Remote Mobile Healthcare Platform to Monitor Cardiovascular and Respiratory Variables,” Sensors (Basel), vol. 17, no. 1, pp. 1– 24, 2017.
- [17] R. A. Khan et A.-S. K. Pathan, «The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey», International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 14, no. 4, p. 1550147718768994, avr. 2018, doi: 10.1177/1550147718768994.
- [18] A. Makke, «Détection d'attaques dans un système WBAN de surveillance médicale à distance», p. 164. 2014.
- [19] P. K. D. Pramanik, A. Nayyar, et G. Pareek, «WBAN: Driving e-healthcare Beyond Telemedicine to Remote Health Monitoring», in Telemedicine Technologies, Elsevier, p. 89-119. 2019,
- [20] Rajkumar Buyya. High Performance Cluster Computing: Architectures and Systems. Prentice Hall PTR, 1999.
- [21] Y. Yousef, "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil," Mulhouse, 2010.
- [22] C. PRODHON, "LE PROBLÈME DE LOCALISATION-ROUTAGE," 2006.
- [23] A. Awasthi, "Développement d'un système de routage hiérarchique pour les réseaux urbains," Université de Metz, 2004
- [24] R.H. Turi, *Clustering-Based Colour Image Segmentation*, PhD Thesis, Monash University, Australia, 2001.

- [25] P. Sneath and R. Sokal, *Numerical Taxonomy*, Freeman, London, UK, 1973.
- [26] M. Anderberg, *Cluster Analysis for Applications*, Academic Press, New York, USA, 1973.
- [27] A. Jain, M. Murty and P. Flynn, Data Clustering: A Review, *ACM Computing Surveys* p264– 323.31(3) (1999).
- [28] Lance et William support de cours (chapitre2). 1967.
- [29] EDWARDS A.W.F., CAVALLI-SFORZA L.L. A method for cluster analysis, *Biometrics* 21, pp. 362-375. 1965.
- [30] MARIE CHAVENT CHRISTIANE GUINOT Y VES LECHEVALLIER MICHEL TENENHAUS Méthodes divisives de classification et segmentation non supervisée : recherche d' une typologie de la peau humaine saine *Revue de statistique appliquée*, tome 47, no4 , p. 87-99. 1999.
- [31] CHAVENT M. Analyse des données symboliques; une méthode division de classification, Thèse, Université Paris IX-Dauphine. 1997.
- [32] Zhang, Tian, Ramakrishnan, Raghu and Livny, Miron, *BIRCH: An Efficient Data Clustering Method for Very Large Databases*, Technical Report, Computer Sciences Dept., Univ. of Wisconsin-Madison, 1995.
- [33] Ward, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function, *Journal of the American Statistical Association*, 58, 236– 244. 1963.
- [34] S. Guha, R. Rastogi, K. Shim . CURE : An Efficient Clustering Algorithm for Large Data-bases. *SIGMOD 1998*, pages 73-84. 1998.
- [35] Fabien Chevalier et Jérôme Le Bellac La classification université de rennes 1 p 23-25. 2012-2013.
- [36] Hadj- Tayeb Karima Département d' Informatique Université des sciences et de la technologie d' Oran, Mohamed Boudiaf (USTO) Oran, Algérie.
- [37] Mariem Soltani Préparée à l' unité de recherche 6164 IETR (Institut d' Électronique et de Télécommunications de Rennes) Équipe : Traitement des Signaux & Images Multicomposantes et Multimodales] . p38-40. 2014.

- [38] M. Kunt, *Reconnaissance des formes et analyse de scènes*. Collection Electricité, 2000.
- [39] Xian Liang, Fuheng Qu , Yong Yang, Hua Cai<sup>2</sup> College of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China.
- [40] Oded Maimon, Lior Rokach ,Chapter 15 CLUSTERING METHODS , DATA MINING AND KNOWLEDGE DISCOVERY HANDBOOK p 332
- [41] R.Suganya, R.Shanthi Department of CS, Dr.SNS.Rajalakshmi College of Arts & Science p 440.
- [42] M. Laszlo, S. Mukherjee, A genetic algorithm using hyper-quadtrees for low-dimensional k-means clustering, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28 (4) 533– 543. 2006.
- [43] Glory H.Shah. 2012 NIRMA UNIVERSITY INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING, NUiCONE-2012, 06-08 DECEMBER, 2012. An Improved DBSCAN, A Density Based Clustering Algorithm with Parameter Selection for High Dimensional Data Sets.
- [44] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jiirg Sander, Xiaowei Xu Institute for Computer Science, University of Munich Oettingenstr. 67, D-80538 Miinchen, Germany {ester / kriegel / sander / xwxu } @informatik.uni-muenchen.de .
- [45] Mihael Ankerst, Markus M. Breunig, Hans-Peter Kriegel, J&g Sander Institute for Computer Science, University of Munich Oettingenstr. 67, D-80538 Munich, Germany.
- [46] R. Agrawal, J. Gehrke, D. Gunopulos, and P. Raghavan, "Automatic Subspace Clustering of High Dimensional Data for Data Mining Applications," *Proc. of the ACM SIGMOD '98 International Conference on Management of Data*, Montreal, Canada, pp.94-105. 1998.
- [47] Damir Demirovic Faculty of Electrical Engineering, University of Tuzla, Tuzla, Bosnia and Herzegovina. An Implementation of the Mean Shift Algorithm p255.
- [48] John S. Ahlquist et Christian Breunig. Model-based Clustering and Typologies in the Social Sciences. Advance Access publication. P96-97. 19 October , 2011
- [49] Bettina Grün Johannes Kepler University Linz. Model-based Clustering. ArXiv: 1807.01987v1[stat.ME].P5-7.5.Jul.2018

- [50] Fraley C, Raftery AE . “ Model-Based Clustering, Discriminant Analysis and Density Estimation.” Journal of the American Statistical Association,97(458), p611– 631. 2002.
- [51] Frühwirth-Schnatter S .“ Panel Data Analysis: A Survey on Model-Based Clustering of Time Series.” Advances in Data Analysis and Classification,5(4), p251– 280. 2011.
- [52] Dempster, A.,Laird,N.,andRubin,D.Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. Journal of the Royal Statistical Society, SeriesB,39(1):p1– 38. 1977.
- [53] McLachlan,G.andKrishnan,T. .The EM algorithm and extensions. Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons. 1997.
- [54] G. Celeux, Govaert, G., “ A Classification EM Algorithm for Clustering and two Stochastic Versions” ,Computational Statistics and Data Analysis, 14,p 315– 332, 1992.
- [55] R. Agrawal, J. Gehrke, D. Gunopulos, and P. Raghavan. Automatic Subspace Clustering of High Dimensional Data for Data Mining Applications. In International Conference Management of Data (SIGMOD’ 98), pages94– 105, Jun.1998.
- [56] G.Sheikholeslami, S. Chatterjee, and A. Zhang. Wave Cluster: A Multi-Resolution Clustering Approach for Very Large Spatial Data bases. In the 24th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB’ 98), pages428– 439,Aug.1998.
- [57] W. Wang,J. Yang ,and R.R.Muntz. STING : A Statistical Information Grid Approach to Spatial Data Mining. In the 23rd International Conference on Very Large Data Bases (VLDB’ 97), pages186– 195,1997.
- [58] T. Soni Madhulatha .IOSR Journal of EngineeringApr., Vol. 2(4) pp: 719-725. 2012.
- [59] G. Sheikholeslami, S. Chatterjee, and A. Zhang.Wavecluster: A multi-resolution clustering approach for verylarge spatial databases. InVLDB, 1998.
- [60] G. Sheikholeslami, S. Chatterjee, and A. Zhang.Wavecluster: A wavelet-based clustering approach for spatialdata in very large databases.VLDB J., 8(3-4), 2000.
- [61] B. K. P. Horn.Robot Vision. The MIT Press, 1988.

- [62] Diery NGOM. Sécurité Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité. Thèse de Doctorat. Université de Haute Alsace France et DAKAR. 2016.
- [63] J. B. MacQueen, “Some methods for classification and analysis of multivariate observations,” in *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, vol. 1, p. 281–297, 1967.
- [64] J.P. Ortega, M. Del, R. B. Rojas, and M. J. Somodevilla, “Research issues on K-means algorithm: An experimental trial using Matlab,” in *Proceedings CEUR Workshop : Semantic Web and new Technologies*, pp. 83–96, 2009.
- [65] W.Heinzelman. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. IEEE. 2000.
- [66] H.OUDANI, S.KRIT et LAHOUCINE EL MAIMOUNI. COMBINING LEACH, PEGASIS HIERARCHICAL PROTOCOL AND CONSTRAINT DISTANCE TO INCREASE THE LIFETIME OF WIRELESS SENSOR NETWORKS. (IJMPERD). 2018.
- [67] Bangash, J.I.; Abdullah, A.H.; Anisi, M.H.; Khan, A.W. A survey of routing protocols in wireless body sensor networks. *Sensors*, 14, 1322–1357. [CrossRef] 2014.
- [68] Anand, J.; Sethi, D. Comparative analysis of energy efficient routing in WBAN. In *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology*, Ghaziabad, India, 9–10 February 2017.
- [69] A Survey of Routing Protocols in WBAN for Healthcare Applications  
Yating Qu , Guoqiang Zheng , Huahong Ma, Xintong Wang, Baofeng Ji, and Honghai Wu, *Sensors*, 19, 1638; doi:10.3390/s19071638 [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors). 2019.
- [70] KHATIR Nadjia, Thèse de doctorat en informatique “ Les techniques de clustering dédiées aux données multimédia », université Ahmed Ben Bella d’ Oran, 2018 /2019.
- [71] Amiotosh Roy Akash, Monir Hossen, Md. Rakibul Hassan, and Md. Imran Hossain  
Gateway Node-based Clustering Hierarchy for Improving Energy Efficiency of Wireless Body Area Networks. p26-28. Septembre 2019
- [72] Energy-efficient Harvested-Aware clustering and cooperative Routing Protocol for WBAN (E-HARP)  
Zahid Ullah, Imran Ahmed, Fakhri Alam Khan, Muhammad Asif, Muhammad Nawaz, Tamleek Ali, Muhammad Khalid, And Fahim Niaz



10.1109/ACCESS.2019.2930652, IEEE Access

[73] Performance Analysis of Wireless Body Area Sensor Analytics using Clustering technique

Rakhee, Kriti Ohri, Vijaya Saraswathi R and L Jai Vinita

International Conference on Communication and Signal Processing, April 4-6, 2019, India