



## Mémoire de Master

### Présenté au

**Département :** Génie Électrique

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Télécommunications

**Spécialité :** Systèmes des Télécommunications

### Réalisé par :

**CHETTABI Hassina**

## Thème

**Maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs  
sans fil à base de l'optimisation de la consommation de  
l'énergie**

Soutenu le : **02/07/2023**

Devant le Jury composé de :

Mr : CHELBI Salim	M.A. A	Univ. Bouira	Président
Mr : SAOUD Bilal	M.C. A	Univ. Bouira	Rapporteur
Mr : ALIMOHAD Abdennour	M.C. B	Univ. Bouira	Examineur



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة).....محمد علي حسينة.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....حالية.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية:.....12.12.63.13.5.....والصادرة بتاريخ.....10-09-2021.....

المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم:..... الهندسة  
الكهربائية.....

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها:....."Maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans  
fil à base de l'optimisation de la consommation de l'énergie".....

تحت إشراف الأستاذ(ة):.....سعود بلال.....

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:.....07-09-2023.....

توقيع المعني(ة)

(م)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

  
H. Melah

% 12

النسبة:itin:

الامضاء:

## Remerciements

*Chaque début s'accompagne d'un dénouement inévitable, Les années sont passées, et le rêve que j'attends depuis longtemps est en fin réalisé. Ô mon Dieu, Louange à Toi avant que Tu sois satisfait, louange à Toi lorsque Tu es satisfait et louange à Toi après que Tu sois satisfait,*

*Car c'est par Ta grâce que Tu m'as guidé et permis de mener à bien ce travail.*

*Aujourd'hui, avec un sentiment de fierté débordante, je lève mon chapeau*

*Je tiens à te monter toute ma gratitude pour ton soutien inconditionnel malgré la longue distance qui nous sépare. Ta présence et ton aide précieuse m'ont permis de contenir les obstacles et de garder le cap tout au long de cette tâche. Tu as été un pilier solide sur lequel je pouvais m'appuyer, et je suis entièrement reconnaissante pour ton soutien et ton encouragement constants, avec tout mon respect et appréciation je te remercie infiniment mon chère frère  
**Dr. Mustapha CHETTABI.***

*Je tiens à remercier du fond du cœur mes parents, ma famille qui a été à mes côtés, a été une source d'instigation et de soutien dans les moments difficiles et joyeux. Votre amour, vos encouragements et vos conseils ont été des détails essentiels qui m'ont aidé à continuer et à atteindre mes objectifs.*

*J'exprime mon remerciement à mon encadrant Bilal SAOUD, qui a été à présent tout au long de ce travail. Tes conseils avisés, ton expertise et ton soutien inaltérable ont joué un rôle déterminant dans la réalisation de mon projet de fin d'étude.*

*Je tenon à remercier les membres du jury qui ont consacré leur temps et leurs compétences pour évaluer mon travail et me fournir des commentaires constructifs. Leurs remarques et leurs suggestions précieuses.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous ceux qui ont de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de mon parcours d'études.*

**MERCI A VOUS.**

## Dédicace

*A mes généreux parents, à ma famille qui a été toujours mon soutien  
dans cette vie,*

*A tout ceux qui font la science et la connaissance leur phase dans la  
vie,*

*A tout ce qui m'ont aidé dans ce travail, de près ou de loin,*

*En particulier, je souhaite adresser une mention spéciale à mon cher  
frère Dr. Mustapha CHETTABI*

*Hassina*

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont devenus une technologie vitale pour diverses applications, notamment la surveillance de l'environnement, la surveillance et l'automatisation industrielle. Un défi critique dans les RCSF est les ressources énergétiques limitées des nœuds de capteurs individuels, qui ont un impact significatif sur la durée de vie opérationnelle du réseau. L'allongement de la durée de vie du réseau est crucial pour assurer une collecte de données prolongée et ininterrompue. Dans cette étude, nous avons proposé un nouveau protocole de routage basé sur le protocole LEACH. Le nouveau schéma proposé a été appelé LEACH-MOD. Il a été implémenté et testé. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de notre nouvelle proposition par rapport au protocole LEACH en termes de durée de vie du réseau.

**Mots clés :** RCSF, Routage, Clustering, LEACH, Durée de vie, Capteur.

## Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) have emerged as a vital technology for various applications, including environmental monitoring, surveillance, and industrial automation. One critical challenge in WSNs is the limited energy resources of individual sensor nodes, which significantly impact the network's operational lifetime. Extending the network's lifetime is crucial to ensure prolonged and uninterrupted data collection. In this study, we have proposed a new routing protocol based on LEACH protocol. The new proposed scheme has been called LEACH-MOD. It has been implemented and tested. Results of simulation show the effectiveness of our new proposition in comparison with LEACH protocol in term of network lifetime.

**Keywords:** WSN, Routing, Clustering, LEACH, Lifetime, Sensor.

# Table des Matières

Remerciements	I
Résumé	II
Table des Matières	III
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux	V
Listes des Acronymes et Symboles	VI

## **Introduction Générale 4**

### **Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux capteurs sans fil**

1. Introduction.....	7
2. Présentation du capteur sans fil .....	7
2.1. Unité de captage .....	8
2.2. Unité de traitement .....	8
2.3. Unité de communication.....	8
2.4. Unité d'énergie :.....	9
3. Les types de capteurs sans fil et leurs caractéristiques.....	9
4. Définition et concepts de base du réseau capteurs sans fil (RCSF) .....	10
4.2. Contraintes des réseaux de capteurs sans fil.....	12
4.3. Communication dans les réseaux de capteurs sans fil.....	13
4.4. Domaine d'application des réseaux capteurs sans fil .....	15
4.5. Défis des réseaux de capteurs sans fil .....	18
5. Conclusion.....	19

### **Chapitre 2 : Protocoles de routages dans les réseaux capteurs sans fil**

1. Introduction .....	21
2. Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil .....	21
3. Classification des protocoles de routage utilisés dans les RCSF .....	21

3.1. Protocoles de routage basés sur la structure du réseau dans les RCSF .....	23
3.2. Protocoles de routage en fonction du type de protocole dans les RCSF .....	24
3.3. Protocoles de routage basés sur l'établissement de la route dans les RCSF .....	25
4. Quelques exemples de protocoles de routage .....	26
4.1. LEACH.....	26
4.2. PEGASIS .....	30
4.3. Les protocoles de routage TEEN et APTEEN .....	30
5. Conclusion.....	32

### **Chapitre3 : Résultats et discussions**

1. Introduction .....	34
2. Modèle Énergétique utilisé.....	34
3. Notre solution.....	35
4. Environnement de travail .....	37
4.1. Présentation de simulateur "Matlab" .....	37
4.2. Exposition de l'interface d'application .....	37
4.3. Les paramètres de simulation .....	39
4.4. Métriques de performances .....	40
4.5. Comparaison des résultats de simulation .....	41
5. Conclusion.....	55

<b>Conclusion Générale</b>	<b>58</b>
----------------------------	-----------

<b>Références</b>	<b>62</b>
-------------------	-----------

## Liste des Figures

Figure 1. 1 : Architecture détaillée d'un capteur sans fil .	8
Figure 1. 2 : Représentation de la zone de communication et de sensation d'un capteur sans fil. .....	10
Figure 1. 3: Exemple d'un capteur sans fil.....	11
Figure 1. 4 : Élément du réseau de capteurs sans fil .	11
Figure 1. 5 : Pile protocolaire d'un RCSF .....	15
Figure 1. 6 : RCSF pour les soins médicaux visant à contrôler l'activité humaine .....	16
Figure 1. 7 : Utilisation de RCSF pour maintenir la capacité de surveillance des cultures durant tout le cycle de production .....	16
Figure 1. 8 : Passerelle de capteur sans fil avec connectivité 4G offre un accès distant.....	17
Figure 1. 9 : RCSF déployé sur un volcan actif .....	17
Figure 1. 10 : Application à base des RCSF pour suivre les dauphins au zoo de Brookfield, Chicago.....	17
Figure 1. 11 : Mise en place de RCSF sur routes .....	18
Figure 2. 1 : Protocoles de routage des RCSF basés sur la structure du réseau .....	22
Figure 2. 2 : Protocoles de routage des RCSF en fonction du type de protocole .....	22
Figure 2. 3 : Protocoles de routage des RCSF fondés sur l'établissement de la route .....	23
Figure 2. 4 : Structure de l'algorithme de formation de clusters distribué pour LEACH .....	28
Figure 2. 5 : Illustration de protocole PEGASIS .....	30
Figure 2. 6 : Regroupement hiérarchique dans les protocoles TEEN et APTEEN .....	31
Figure 3. 1 : Schéma de déperdition énergétique .	34
Figure 3. 2 : Organigramme de sélection des chefs de groupe LEACHMOD.....	36
Figure 3. 3 : L'interface de l'application de simulation .....	38
Figure 3. 4 : Distribution aléatoire des nœuds dans le déploiement sur BS (50,50) .....	42
Figure 3. 5 : Comparaison du nombre de nœuds inactifs sur une période de 4000 rounds sur BS (50,50) .....	42
Figure 3. 6 : Comparaison d'énergie consommée sur une période de 4000 rounds sur BS (50,50) .....	43
Figure 3. 7 : Illustration des déploiements des nœuds capteurs dans le réseau sur BS (150,50) .....	44

Figure 3. 8 : Comparaison du nombre de nœuds inactifs sur une période de 4000 rounds sur BS (150,50) .....	45
Figure 3. 9 : Comparaison de première nœud mort selon la position de BS .....	46
Figure 3. 10 : Comparaison de l'énergie consommée sur une période de 4000 rounds sur BS (150,50) .....	46
Figure 3. 11 : Comparaison des nœuds morts sur 4000 rounds sur $200*200x^2$ .....	48
Figure 3. 12 : Comparaison de premier nœud mort selon la surface se surveillance ( $X_m, Y_m$ ) .....	49
Figure 3. 13 : Comparaison des nœuds morts sur 4000 rounds avec $P=0.07$ .....	50
Figure 3. 14 : Comparaison des nœuds morts sur 4000 rounds avec $P=0.2$ .....	51
Figure 3. 15 : Comparaison de premier nœud mort selon la valeur de P .....	52

## Liste des Tableaux

Tableau 3. 1 : Caractéristiques matérielles de la machine utilisée pour la simulation.....	37
Tableau 3. 2 : Les paramètres détaillés de simulation.....	40
Tableau 3. 3 : Synthétise sur les résultats des comparaisons précédentes et d'autres comparaisons.....	54

---

## Listes des Acronymes et Symboles

APTEEN	Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector
BS	Station de base
CH	Cluster head
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DSR	Dynamic Source Routing
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector routing
FSR	Fisheye State Routing
GAF	Geographic adaptive fidelity
GEAR	Geographic and energy-aware routing
GPS	Global Positioning System
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LEACH_MO	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy-modified
D	
MAC	Media Access Control
MATLAB	Matrix laboratory
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QoS	Quality Of Service
RAM	Random Access Memory
RCSF	Réseau Capteur Sans Fil

SAR	Specific Absorption Rate
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
TDMA	Time Division Multiple Access
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

Au cours des dernières années, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont connu une croissance exponentielle, en raison de leurs nombreuses applications dans des domaines tels que la surveillance environnementale, la santé, l'industrie et l'agriculture. Les avancées récentes dans le domaine des RCSF se sont concentrées sur l'amélioration des performances de ces réseaux et la maximisation de leur durée de vie en optimisant la consommation d'énergie [1].

Les progrès technologiques récents dans les batteries et les techniques de récupération d'énergie ont permis d'accroître la durée de vie des RCSF. De plus, des techniques de communication sans fil, telles que la communication à bande étroite et la communication par infrarouge, ont été développées pour améliorer la fiabilité et l'efficacité des échanges de données entre les capteurs et la station de base [2].

Les avancées dans le domaine des télécommunications, des communications sans fil et de l'électronique numérique ont ouvert de nouvelles opportunités pour la conception de capteurs peu coûteux et économes en énergie, capables d'interagir entre eux. Ces capteurs, lorsqu'ils interagissent collectivement, forment un réseau de capteurs qui constitue une infrastructure de communication [3].

Au sein des RCSF, où un grand nombre de capteurs sont déployés de manière aléatoire pour surveiller divers phénomènes, le routage de l'information revêt une importance capitale. Les capteurs interagissent en utilisant des liaisons radio pour échanger des informations et mettre en œuvre des traitements coopératifs. Cependant, l'optimisation du routage dans ces réseaux demeure un défi majeur [4].

Une approche couramment utilisée est le routage hiérarchique, où les capteurs s'autoorganisent en clusters pour faciliter la transmission des données vers un point de collecte. Le protocole LEACH est considéré comme la pierre angulaire des protocoles de routage hiérarchiques dans les RCSF. Cependant, lors de son application à des réseaux de grande envergure, des limites ont été observées en termes de durée de vie des capteurs et de consommation d'énergie.

Pour améliorer la durée de vie du réseau et optimiser l'utilisation de l'énergie, des variantes du protocole LEACH ont été proposées, telles que LEACH-MOD. Ces variantes intègrent des critères tels que l'énergie résiduelle et la distance par rapport à la station de base pour sélectionner les nœuds leaders de cluster. Toutefois, il est nécessaire d'évaluer l'efficacité de ces variantes par rapport au protocole de base LEACH, ainsi que leur impact sur la durée de vie des capteurs et la consommation d'énergie.

Dans ce contexte, notre étude vise à explorer les aspects généraux des RCSF, approfondir la problématique du routage au sein de ces réseaux en mettant l'accent sur le routage hiérarchique, et présenter le fonctionnement du protocole LEACH, ainsi que sa variante LEACH-MOD. En conclusion de notre travail, nous procéderons à une simulation comparative de ces protocoles, y compris le protocole de base LEACH, afin d'évaluer leur efficacité en termes de durée de vie du réseau, de consommation d'énergie et de maintien des capteurs actifs.

Dans cette étude, nous visons à approfondir notre compréhension des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) en examinant leur importance croissante dans divers domaines d'application et en soulignant la nécessité de maximiser la durée de vie de ces réseaux grâce à une optimisation de la consommation d'énergie. Nous mettons en évidence les avancées récentes en termes de technologie des batteries et de récupération d'énergie, ainsi que les techniques de communication sans fil qui ont contribué à améliorer les performances des RCSF.

Notre manuscrit a été organisé auteurs de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, des notions sur les réseaux capteurs sans fil (RCSF) et leurs domaines d'applications. Ensuite, les protocoles de routage dans les RCSF seront présentés avec leur classification. Notre contribution sera illustrée dans le troisième chapitre avec les résultats de la simulation. Finalement, on terminera par une conclusion.

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur les réseaux capteurs sans fil**

### 1. Introduction

Au cours des dernières années, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont suscité un grand intérêt de la part des scientifiques en raison de leurs applications dans divers domaines, tels que la surveillance environnementale, la sécurité, la santé et l'industrie. Les RCSF sont des réseaux de nœuds sans fil capables de collecter et de transmettre des données à partir de leur environnement immédiat.

Dans ce chapitre, nous visons à donner un aperçu des RCSF en présentant leur définition, leur architecture, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application. De plus, nous examinerons les principaux défis liés à la mise en œuvre des RCSF, notamment la gestion de l'énergie, la sécurité, la connectivité et la fiabilité. Comprendre ces aspects clés des RCSF est essentiel pour améliorer leur conception, leur mise en œuvre et leur utilisation dans divers domaines d'application.

### 2. Présentation du capteur sans fil

Le capteur sans fil est un appareil électronique qui est conçu pour mesurer des valeurs physiques telles que la température, l'humidité, la pression, la luminosité, et le convertir en un signal numérique exploitable par le système électronique. Chaque capteur sans fil se compose de quatre composants principaux : une unité de détection et de captage, une unité de traitement de l'information, une unité d'alimentation et une unité de communication [5].

En effet, un capteur sans fil est un capteur spécifique qui utilise la technologie sans fil pour transmettre des données obtenues à distance sans nécessiter de câblage physique. Cette technologie de capteur sans fil est largement utilisée dans de nombreux domaines d'application tels que l'agriculture, la surveillance de l'environnement et de la santé.

L'architecture du capteur est représentée sur la figure ci-dessous, illustrant les différents composants impliqués dans la mesure et la transmission des données [6].

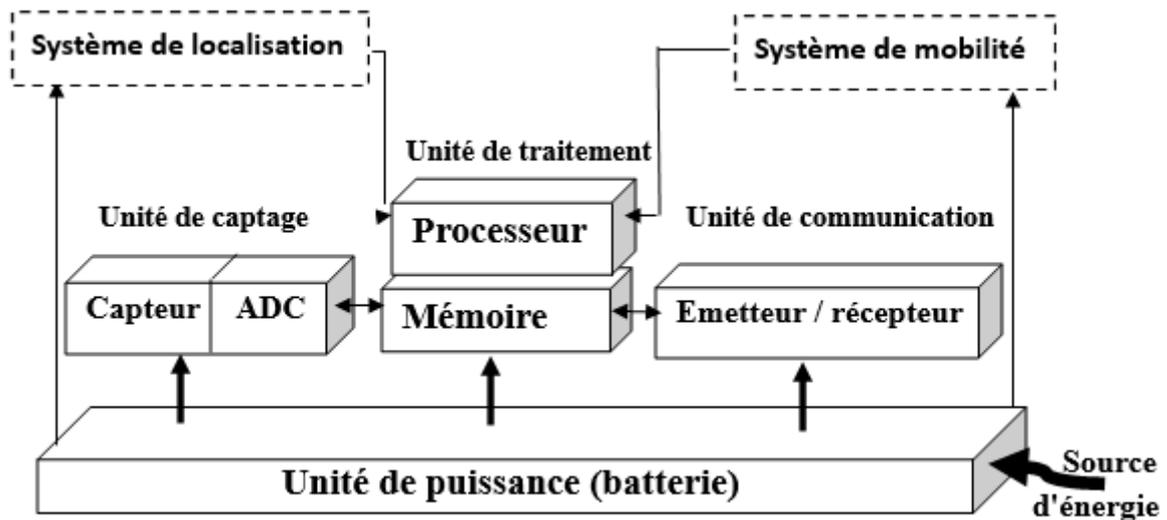


Figure 1. 1 : Architecture détaillée d'un capteur sans fil [6].

### 2.1. Unité de captage

L'unité de captage est un composant clé des systèmes qui mesurent des grandeurs physiques. Elle est composée de deux sous-unités principales : un convertisseur analogique-numérique et un capteur. Le capteur est conçu pour détecter des valeurs environnementales physiques telles que la température, la pression, l'humidité, etc. Il convertit ensuite cette grandeur en un signal analogique, qui est transmis à un convertisseur analogique-numérique. Le convertisseur se charge de convertir le signal analogique en un signal numérique, qui peut être facilement traité et analysé par l'unité de traitement.

### 2.2. Unité de traitement

Le traitement des données collectées par les capteurs est assuré par l'unité de traitement, qui est composée d'un processeur et d'une mémoire RAM. Cette unité est chargée de coordonner les différentes actions des autres unités pour assurer un fonctionnement efficace et fiable. Certains capteurs peuvent être intégrés au système d'exploitation, ce qui leur permet de fonctionner comme un élément intégral. L'unité de traitement peut également être reliée à l'unité de stockage, où elle est utilisée pour stocker les données collectées par le capteur, assurant ainsi une meilleure utilisation et une meilleure gestion de l'ensemble du système de capteurs.

### 2.3. Unité de communication

L'unité de communication joue un rôle clé dans la transmission des données entre deux nœuds sans fil. Cet appareil permet l'émission et la réception de signaux radiofréquence qui contiennent des données à transmettre. Elle met en œuvre les procédures nécessaires pour transmettre les bits présents comme d'ondes radiofréquences et les récupérer à l'autre extrémité. En d'autres termes, l'unité de

communication permet de connecter le réseau de capteurs sans fil à travers les nœuds en assurant une transmission intègre des données. La qualité de cette dernière est un facteur déterminant dans la performance du RCSF.

### 2.4. Unité d'énergie :

L'unité d'énergie représente un élément fondamental dans les réseaux de capteurs sans fil, car l'énergie est essentielle pour assurer la détection, la communication et le traitement des données. La consommation d'énergie varie selon la nature de ces fonctions, la communication des données étant l'activité la plus énergivore. Les batteries et les condensateurs sont utilisés pour stocker l'énergie. Cependant, les batteries sont considérées comme la principale source d'alimentation des nœuds de capteurs, car elles fournissent une quantité d'énergie plus importante. Par conséquent, il est important de gérer l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil afin de maximiser leur efficacité et leur durée de vie [5].

## 3. Les types de capteurs sans fil et leurs caractéristiques

### 3.1. Les types de capteurs sans fil

Les capteurs sans fil peuvent être classés en différents types selon leur fonction. De plus, il est possible de les diviser en deux groupes, les capteurs actifs et passifs, en fonction de leurs propres capacités de génération de signal [6].

**3.1.1. Le capteur actif** : est un appareil qui convertit une grandeur physique en un signal électrique et est capable de générer sa propre énergie pour alimenter ce signal. Parmi les exemples de capteurs actifs, on peut citer le thermocouple et le capteur de pression [7].

**3.1.2. Le capteur passif** : est un appareil qui nécessite une source d'alimentation externe pour convertir une grandeur physique en un signal électrique. Il n'est pas autonome en matière d'alimentation électrique et nécessite une source d'alimentation pour fournir des informations. Les capteurs de position et d'humidité sont des exemples de capteurs passifs [7].

### 3.2. Caractéristiques d'un capteur sans fil

Les caractéristiques des capteurs sans fil dépendent sur deux entités principales données par leur fonctionnement [8].

**3.2.1. L'unité d'acquisition** est une partie physique central qui accède à mesurer une grandeur physique.

**3.2.2. L'unité de communication** est chargée de transformer les mesures prises par l'unité d'acquisition à d'autres appareils électroniques. Chaque capteur est caractérisé par un rayon de communication et un rayon de détection.

La figure 1.2 illustre les zones définies par le rayon de communication  $R_c$  et le rayon de détection  $R_s$  d'un capteur.

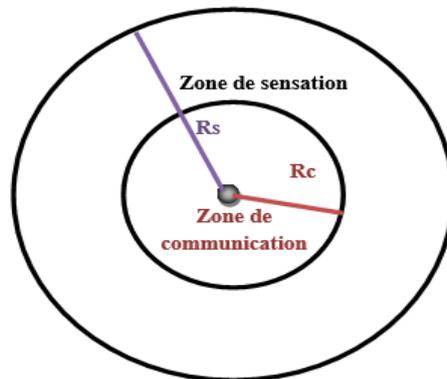


Figure 1. 2 : Représentation de la zone de communication et de sensation d'un capteur sans fil [9].

La zone de communication fait référence à la zone où le capteur peut communiquer avec d'autres capteurs, tandis que la zone de détection (ou de sensation) correspond à la zone où le capteur peut détecter un événement ou une grandeur physique.

#### 4. Définition et concepts de base du réseau capteurs sans fil (RCSF)

Le réseau de capteurs sans fil se consiste de nombreux nœuds de capteurs, qui sont de petits dispositifs déployés dans un espace donné, chargés de collecter et de transmettre des données [10]. Les nœuds de capteurs interagissent les uns avec les autres et utilisent des nœuds relais pour transformer des données à la station de base ou au récepteur, également appelé "sink" en anglais.



Figure 1. 3: Exemple d'un capteur sans fil

### 4.1. Architecture et caractéristiques générales d'un réseau de capteurs sans fil

#### 4.1.1. Architecture d'un réseau capteurs sans fil

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) se constitue d'un ensemble distribué de nombreux nœuds de capteurs interconnectés à travers des canaux de communication sans fil. Le nombre de nœuds peut varier de quelques dizaines à des milliers. Au centre de ce réseau se trouve la station de base (BS), également connue sous le nom Sink, qui est comme un nœud de capteur central. Cette station de base est équipée d'une source d'alimentation fixe et est connectée à un serveur pour traiter les données collectées à partir des nœuds de capteurs [11].

La connectivité à distance des nœuds de capteurs est rendue possible aux utilisateurs par l'interconnexion des puits (station de base) et des réseaux d'infrastructure tels que l'internet via des liaisons satellites, permet de collecter des informations en temps réel et de surveiller les zones difficiles d'accès ou dangereuses pour l'homme [11].

La figure au-dessus montre cette interconnexion qui permet aux données collectées par les nœuds de capteurs d'être transformé en temps réel via des réseaux d'infrastructure aux utilisateurs, tels que l'internet.

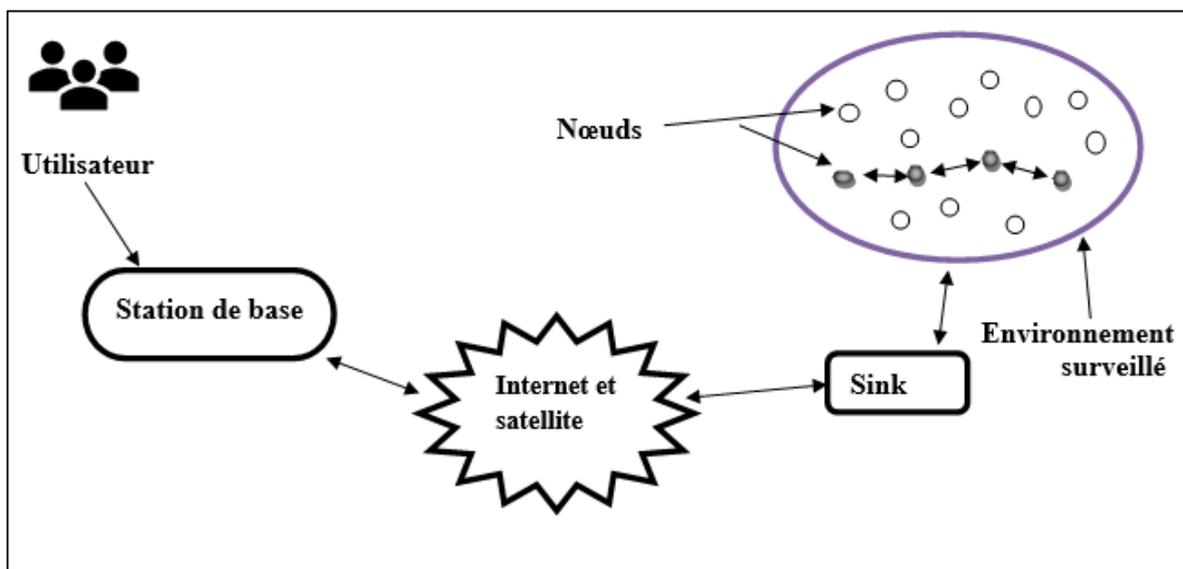


Figure 1. 4 : Élément du réseau de capteurs sans fil [12].

### 4.1.2. Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Les réseaux de capteurs présentent un ensemble de caractéristiques clés, notamment [13] :

**4.1.2.1. Sans infrastructure** : les réseaux de capteurs sans fil sont déployés sans infrastructure, ce qui signifie que les capteurs doivent s'autoorganiser sans intervention humaine, souvent de manière aléatoire dans des zones d'intérêt pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

**4.1.2.2. Scalabilité** : la scalabilité est une caractéristique importante des RCSF, qui implique le déploiement d'un grand nombre de capteurs pour couvrir efficacement la zone d'intérêt et faire face aux interruptions potentielles.

**4.1.2.3. Interférences** : le phénomène d'interférence est courant dans les réseaux sans fil, en particulier dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) où des capteurs adjacents peuvent transmettre sur la même fréquence, provoquant des interférences.

**4.1.2.4 Topologie dynamique** : il est possible d'attacher des capteurs sans fil à des objets en mouvement tels que des animaux pour surveiller leur comportement sans interférer avec celui-ci. Cette situation crée une topologie dynamique dans le réseau de capteurs sans fil.

**4.1.2.5. Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul** : la limitation des ressources en énergie, stockage et calcul constitue une contrainte majeure des réseaux de capteurs sans fil. La plupart des recherches s'intéressent principalement à l'énergie, car les capteurs ont des sources d'alimentation limitées.

### 4.2. Contraintes des réseaux de capteurs sans fil

Les capteurs sans fil possèdent une quantité de mémoire vive (RAM) et sont équipés d'un espace de stockage limité. Par conséquent, ils ne sont donc pas adaptés pour stocker de grandes quantités de données. Les données collectées doivent être transmises à la station de base plutôt que d'être stockées en permanence par les capteurs eux-mêmes [14].

**4.2.1. Tolérance aux fautes** : la tolérance aux fautes est une caractéristique importante des réseaux de capteurs sans fil, car les capteurs peuvent être sensibles aux changements d'état, tels que les événements météorologiques ou les batteries faibles. Dans de tels cas, un ou plusieurs capteurs peuvent ne pas fonctionner correctement, et le réseau doit être capable de détecter ces pannes et de

les corriger. Cela peut être réalisé en modifiant les tables de routage du réseau pour trouver un chemin alternatif pour transmettre les informations. Par conséquent, la tolérance aux pannes est essentielle pour assurer la fiabilité et la durabilité des réseaux de capteurs sans fil dans des environnements difficiles.

**4.2.2. Mise à l'échelle :** la mise à l'échelle est une caractéristique importante des réseaux de capteurs sans fil, où le nombre de capteurs peut varier de quelques entités à plusieurs dizaines de milliers. Pour assurer une couverture complète de la zone d'intérêt et gérer les interruptions, ces réseaux doivent être autoorganisés à grande échelle et être efficaces, quel que soit le nombre de capteurs déployés. Les protocoles de ces réseaux doivent être conçus pour fonctionner et s'adapter selon le nombre de nœuds. Cela permet aux réseaux de capteurs sans fil de surveiller de vastes zones tout en fournissant des données précises en temps réel.

**4.2.3. Limitation de l'énergie :** la limitation de l'énergie est une caractéristique clé des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), où les capteurs fonctionnent sur batterie avec une énergie limitée. En outre, les RCSF sont souvent déployés dans des zones difficiles d'accès, ce qui rend difficile l'intervention humaine pour changer les batteries des capteurs. Si le nombre de capteurs est important, il est également difficile de détecter et de remplacer les capteurs défectueux.

**4.2.4. La connectivité :** la connectivité est un enjeu majeur dans les réseaux de capteurs sans fil, qui nécessite des liens entre tous les nœuds pour fonctionner efficacement. La connectivité dépend de l'existence de liaisons entre les nœuds et est affectée par les changements de topologie tels que la mobilité, les défaillances de nœuds et les attaques, qui peuvent entraîner la perte de liens de communication, l'isolement de certains nœuds et le partitionnement du réseau. Des techniques telles que le routage multi-chemin, l'équilibrage de charge et la redondance peuvent être utilisées pour améliorer la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil. Cependant, ces techniques ont des coûts énergétiques supplémentaires, qui doivent être pris en compte pour assurer une utilisation efficace des ressources limitées du réseau.

### 4.3. Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

#### 4.3.1. Pile protocolaire

La pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est composée de cinq couches similaires à celles du modèle OSI, auxquelles s'ajoutent trois autres plans [14]. Chaque couche interagit avec les couches inférieures pour fournir des services au niveau supérieur. Cette structure hiérarchique permet de mieux gérer les contraintes des RCSF en termes de ressources limitées et de

tolérance aux erreurs. La pile protocolaire est essentielle pour assurer une communication fiable et efficace dans les RCSF [16].

**4.3.1.1. La couche application :** elle agit comme l'interface entre l'utilisateur et le réseau, permettant à ce dernier d'accéder aux services de base comme le transfert de fichiers ou la messagerie. Par conséquent, cette couche est essentielle pour la communication entre l'utilisateur et le réseau.

**4.3.1.2. La couche transport :** assure le transport des données en divisant les messages en unités plus petites si nécessaire, et en optimisant les ressources du réseau en créant plusieurs connexions réseau par processus de la couche session pour améliorer le débit et en utilisant le multiplexage pour transporter plusieurs messages à la fois. Elle est également chargée de fournir le type de service et le contrôle de flux, ainsi que d'établir et de libérer les connexions sur le réseau.

**4.3.1.3. La couche réseau :** elle est responsable de la gestion du sous-réseau, y compris le routage des paquets et l'interconnexion des sous-réseaux. La couche doit définir le mécanisme de routage et le calcul de la table de routage, contrôler l'engorgement du sous-réseau et peut inclure des fonctions de comptabilité pour la facturation au volume.

**4.3.1.4. La couche liaison de données :** elle relie la couche physique et la couche réseau et rend la transmission des données sans erreur. Elle décompose les données en trames, les transmet dans l'ordre et gère les acquittements renvoyés par le récepteur. Il doit également être capable de détecter et de corriger les erreurs de transmission, tout en évitant les interférences avec le récepteur.

**4.3.1.5. La couche physique :** elle garantit que les données sont transmises sur le canal de communication en veillant à ce que les données soient parfaitement transmises.

En outre, cette pile protocolaire dispose de trois plans de gestion :

**4.3.1.6. Plan de gestion de tâche :** il équilibre et organise les différentes tâches de collecte de données dans une région particulière. Les nœuds n'ont pas besoin d'exécuter la tâche de collecte en même temps, car certains nœuds peuvent exécuter cette tâche plus souvent que d'autres en fonction de leur niveau de batterie.

**4.3.1.7. Plan de gestion de mobilité :** la gestion de mobilité dans un réseau de capteurs sans fil implique l'enregistrement des mouvements des nœuds et l'utilisation de ces emplacements pour détecter les nœuds voisins. Cette couche est également chargée d'effectuer une auto-organisation des nœuds en cas de défaillance de certains d'entre eux ou en modifiant leur position.

**4.3.1.8. Plan de gestion d'énergie :** le plan de gestion d'énergie est chargé de contrôler et de gérer la consommation d'énergie des nœuds de capteurs en fonction de leur mode de fonctionnement. Elle permet d'optimiser la consommation d'énergie en évitant les messages redondants et en informant les nœuds voisins lorsqu'un nœud atteint un bas niveau d'énergie. Cela permet de maximiser l'utilisation de l'énergie restante pour la capture et la détection des tâches.

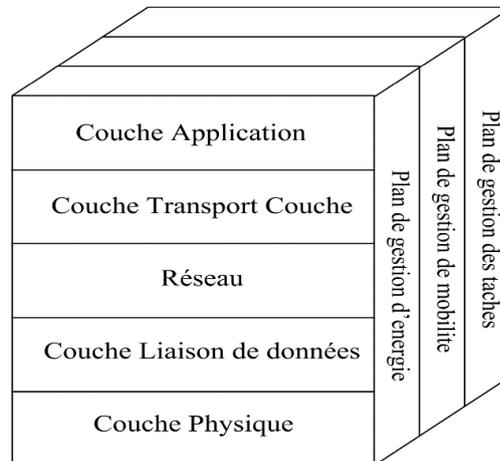


Figure 1. 5 : Pile protocolaire d'un RCSF [17].

### 4.4. Domaine d'application des réseaux capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans de nombreux domaines et leurs applications peuvent être classées en plusieurs catégories en fonction de l'objectif et du domaine d'utilisation [18,19].

**4.4.1. Suivi des soins de santé :** l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) dans le domaine médical permet un suivi permanent des patients en surveillant différents paramètres tels que les organes vitaux, la glycémie et la détection du cancer, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies. La figure 1.6 présente une illustration de cela.

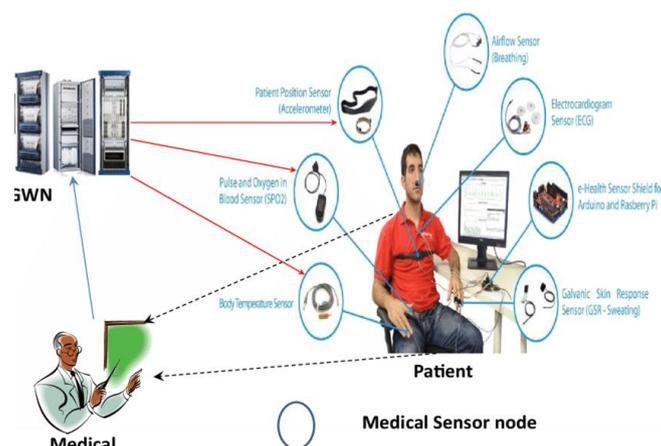


Figure 1. 6 : RCSF pour les soins médicaux visant à contrôler l'activité humaine

**4.4.2. Précision agricole :** la précision agricole peut être améliorée en utilisant les données collectées par des capteurs pour estimer les densités de semis optimales, les besoins en engrais et autres besoins en intrants, et prédire les rendements des cultures plantées, comme le montre la figure ci-dessous :



Figure 1. 7 : Utilisation de RCSF pour maintenir la capacité de surveillance des cultures durant tout le cycle de production

**4.4.3. Sécurité et surveillance :** les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés pour la sécurité et la surveillance en permettant une surveillance à distance des zones d'intérêt et la détection d'activités suspectes ou ennemies. En effet, les données collectées par les capteurs sont analysées pour fournir des informations précieuses pour la surveillance et la sécurité.

**4.4.4. Bâtiments ou ponts intelligents :** les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés dans les bâtiments et les ponts intelligents pour surveiller leur structure et leur environnement et contrôler leur fonctionnalité. La figure 1.8 présente un exemple de contrôle de pont utilisant des capteurs sans fil.



Figure 1. 8 : Passerelle de capteur sans fil avec connectivité 4G offre un accès distant

**4.4.5. Surveillance de l'environnement :** les réseaux de capteurs sans fil sont souvent utilisés pour la surveillance de l'environnement, y compris la détection de catastrophes naturelles telles que les tremblements de terre, les incendies et les tsunamis. Les données collectées peuvent également aider à sensibiliser les gens et à prendre des mesures préventives, comme illustré dans la figure 1.9 montrant un exemple de RCSF pour la surveillance d'un volcan actif.



Figure 1. 9 : RCSF déployé sur un volcan actif

**4.4.6. Suivi des animaux :** le suivi des animaux à l'aide de capteurs fixés à leur corps permet de collecter des informations sur leur emplacement et leur comportement. Cette technique est illustrée par un exemple d'application de suivi de précision pour les dauphins au zoo de Brookfield, présenté dans la figure 1.10.

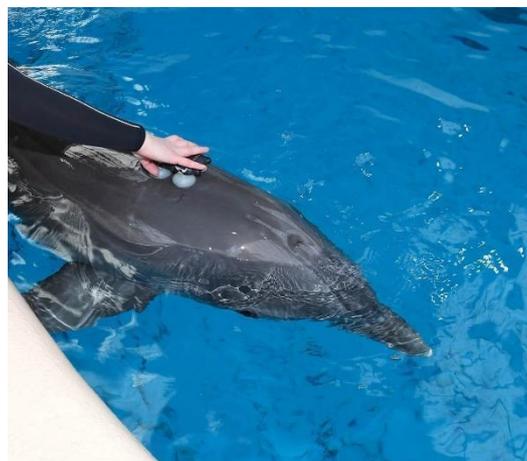


Figure 1. 10 : Application à base des RCSF pour suivre les dauphins au zoo de Brookfield, Chicago

**4.4.7. Suivi des véhicules :** les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés pour suivre les véhicules en ville, détecter les infractions au code de la route et surveiller le trafic afin de réduire les embouteillages. Un exemple d'application est illustré à la Figure 1.11, démontrant un système de stationnement intelligent qui surveille le trafic automobile et les embouteillages.

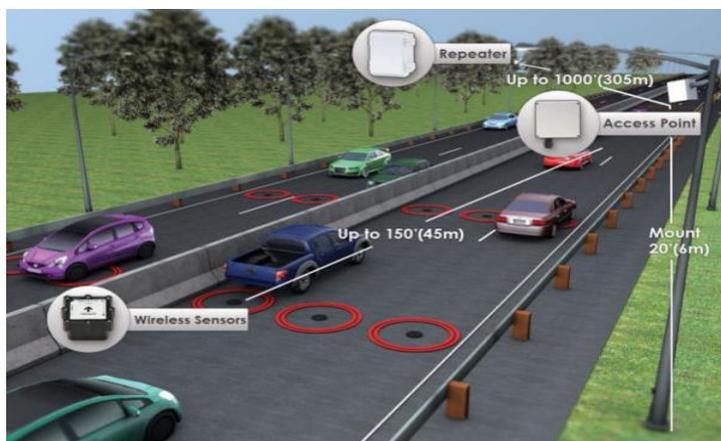


Figure 1. 11 : Mise en place de RCSF sur routes

### 4.5. Défis des réseaux de capteurs sans fil

Les défis majeurs auxquels les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont confrontés peuvent être classés en différentes catégories comme ci-dessous [20] :

**4.5.1. Localisation :** l'amélioration des technologies de localisation est une préoccupation importante pour les réseaux de capteurs sans fil.

**4.5.2. La sécurité :** la sécurité est un défi majeur pour les réseaux de capteurs sans fil, car les nœuds ne peuvent pas empêcher les pannes ou les attaques. Les attaques telles que l'écoute clandestine, le brouillage et les retransmissions peuvent entraver ou empêcher les opérations. La confidentialité, le contrôle d'accès et l'intégrité des messages doivent être assurés pour maintenir la sécurité du réseau.

**4.5.3. Environnement :** les capteurs sont souvent installés en grand nombre dans des zones isolées ou défavorables, ce qui les oblige à être autonomes et à fonctionner sans surveillance. Par conséquent, les réseaux de capteurs sans fil doivent pouvoir fonctionner dans des environnements difficiles d'accès.

**4.5.4. Topologie dynamique :** dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), le changement de la topologie est un aspect important, car cela peut entraîner des problèmes de connectivité, notamment en raison de la mobilité des nœuds, de l'épuisement des réserves énergétiques des nœuds ou de l'ajout

de nouveaux nœuds. Par conséquent, il est donc important de développer des mécanismes pour gérer efficacement la topologie dynamique du réseau.

**4.5.5. Agrégation de données :** l'augmentation de la puissance de transmission du capteur pour transmettre sur de plus longues distances augmentera la consommation d'énergie et réduira la durée de vie du capteur. Pour résoudre ce problème, l'agrégation de données est utilisée pour compresser les données pendant le routage afin de réduire la consommation d'énergie.

**4.5.6. Consommation d'énergie :** la consommation d'énergie est l'un des principaux défis dans des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), car les nœuds ont une quantité d'énergie limitée. Le transfert de données entre les nœuds peut entraîner une consommation excessive d'énergie, ce qui peut raccourcir la durée de vie des nœuds et nécessiter une réorganisation du réseau en cas de panne.

**4.5.7. La durée de vie :** la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) dépend de leur utilisation et est étroitement liée à leur efficacité de fonctionnement. Les nœuds de capteurs ont une capacité de stockage et une puissance de calcul très limitée, ce qui affecte leur cycle de vie.

## 5. Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil constituent un progrès important dans le domaine des technologies de l'information et de la communication et suscitent un intérêt considérable. Cette technologie émergente attire de plus en plus d'intérêt en raison de sa polyvalence et de sa vaste gamme d'applications dans divers domaines comme la santé, l'environnement, l'industrie ou encore le sport.

Ce chapitre s'est intéressé à l'architecture des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), ainsi qu'à leurs caractéristiques et domaines d'application. Il a été souligné que la durée de vie des RCSF et la consommation d'énergie sont des aspects cruciaux dans la conception de tels réseaux. En effet, l'efficacité énergétique et la qualité de service sont des facteurs déterminants pour garantir une bonne communication et une collecte de données fiable.

Le chapitre suivant se penchera sur les différents protocoles de routage disponibles dans les RCSF pour mieux comprendre leur fonctionnement et leurs performances.

# **Chapitre 2**

## **Les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

## **1. Introduction**

Le routage est un élément clé dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) pour acheminer les données entre les nœuds et la station de base. Les protocoles de routage sont utilisés pour établir des chemins entre les nœuds et la station de base tout en respectant les contraintes de consommation d'énergie et de temps de transmission.

Ce chapitre présente une vue concentrée sur les protocoles de routage dans les RCSF, en commençant par la définition de routage puis une généralité sur la classification de ces protocoles et ces types existants ensuite donner quelques exemples sur ces derniers.

## **2. Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

Le routage est un processus permettant de sélectionner des chemins pour transmettre des données entre un expéditeur et un ou plusieurs destinataires dans différents domaines tels que les réseaux téléphoniques, électroniques et de transports [21].

Dans un réseau de capteurs sans fil, l'objectif principal d'un protocole de routage est de fournir un itinéraire correct et efficace entre deux nœuds pour transmettre des messages. Ce protocole permet aux nœuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers un point de collecte [22].

## **3. Classification des protocoles de routage utilisés dans les RCSF**

De multiples approches de routage ont été développées pour les réseaux de capteurs sans fil. Certaines d'entre elles sont des adaptations de stratégies de routage déjà existantes dans d'autres types de réseaux, tandis que d'autres sont spécifiquement conçues pour les réseaux de capteurs sans fil [23].

Les protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil ont fait l'objet de nombreuses études et peuvent être catégorisés selon plusieurs critères. La présente section décrit la façon dont ces protocoles sont classés en trois critères différents. Les critères de classification incluent la structure du réseau, l'établissement de la route ainsi que le type de protocole utilisé.

Un exemple de cette classification est présenté aux figures 2.1, 2.2 et 2.3, qui fournissent une meilleure compréhension des différents protocoles de routage qui existent dans les RCSF.

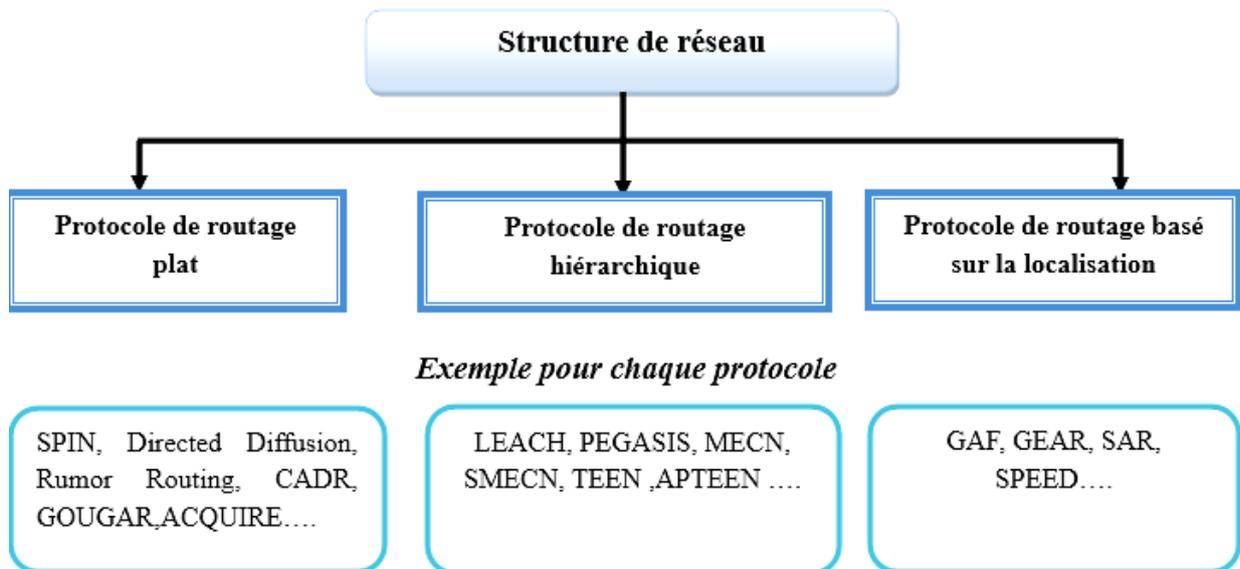


Figure 2. 1 : Protocoles de routage des RCSF basés sur la structure du réseau [24].

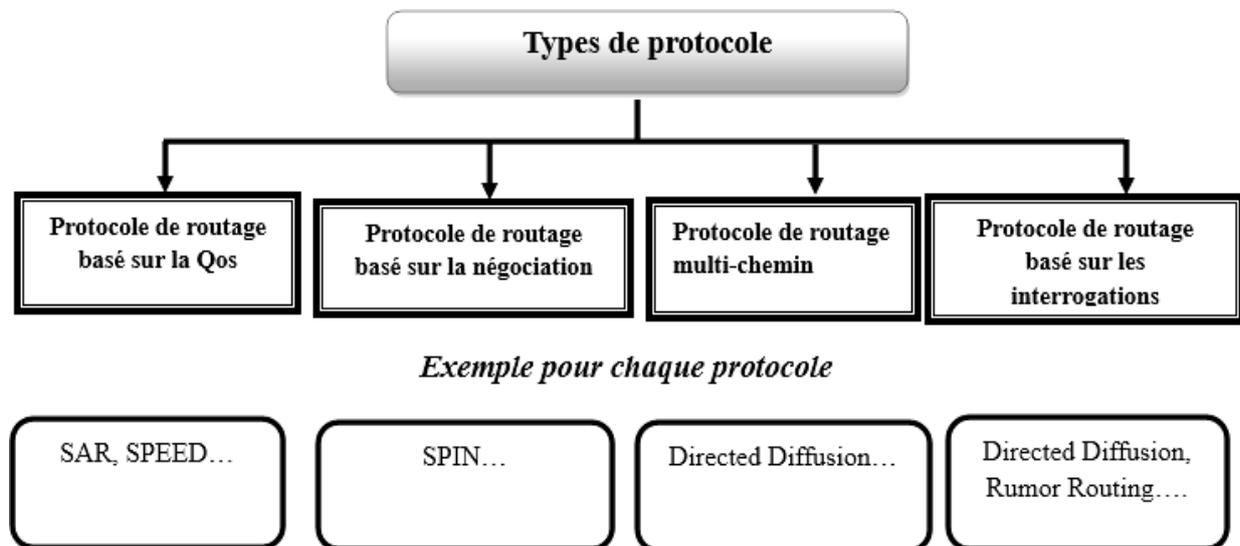


Figure 2. 2 : Protocoles de routage des RCSF en fonction du type de protocole [25].

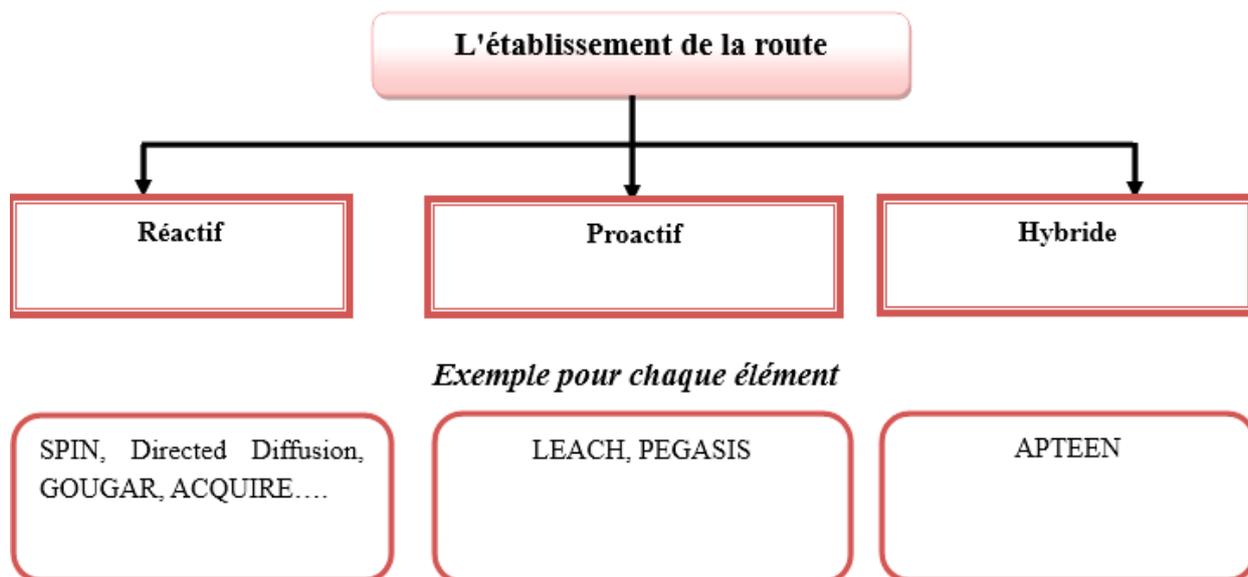


Figure 2. 3 : Protocoles de routage des RCSF fondés sur l'établissement de la route [26].

### 3.1. Protocoles de routage basés sur la structure du réseau dans les RCSF

#### 3.1.1. Protocoles de routage plat

Les protocoles de routage plat se caractérisent par la communication sans utiliser d'adresses ou d'identifiants [27]. La transmission des données se produit sur des zones spécifiques du réseau de manière itérative, de proche en proche. Généralement, pour réaliser un transfert de données, la source initie le processus en diffusant une annonce préalable des données à transmettre. Les nœuds voisins, intéressés par ce message, envoient ensuite des demandes pour obtenir les données. Une fois que toutes les demandes ont été reçues, les données sont alors transmises. Parmi les protocoles de routage plat souvent utilisés figurent SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), Direct Diffusion et Rumor routing. Ces protocoles offrent des mécanismes efficaces d'annonce, de requête et de transmission pour faciliter la diffusion des données dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF).

#### 3.1.2. Protocoles hiérarchiques

Les protocoles de routage hiérarchiques présentent une structure de réseau où les nœuds ne sont pas tous équivalents en termes de capacité et de niveau. Ils sont organisés en clusters, où chaque cluster est constitué de plusieurs nœuds avec un chef de cluster chargé de transmettre les messages émis par son cluster aux autres chefs de clusters afin d'atteindre la destination finale. Le chef de cluster peut être soit un nœud doté de capacités supérieures, soit il est sélectionné de manière cyclique en fonction du nombre de voisins et du niveau d'énergie résiduelle. Un exemple notable de protocole

hiérarchique est LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), qui choisit aléatoirement les nœuds chef de cluster et attribue ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin afin d'assurer une dissipation équitable de l'énergie entre les nœuds. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les chefs de cluster agrègent les données collectées par les nœuds membres de leur cluster et envoient un paquet agrégé à la station de base. D'autres protocoles tels que PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) et TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network) sont également utilisés dans ce contexte [27].

### **3.1.3. Protocoles basés sur la localisation**

Les protocoles de routage basés sur la localisation s'appuient sur un système GPS basse consommation intégré aux capteurs, leur permettant d'estimer la distance et le coût des transmissions. Ces protocoles supposent que les nœuds sont conscients de leur position respective et sont en mesure de déterminer la position des autres nœuds. Cette connaissance facilite la diffusion d'informations vers une région spécifique où se trouve la destination souhaitée. Parmi les protocoles couramment utilisés, on retrouve GEAR (Geographic and Energy Aware Routing) et GAF (Geographic Adaptive Fidelity) [27].

## **3.2. Protocoles de routage en fonction du type de protocole dans les RCSF**

### **3.2.1. Protocoles de routage basés sur la qualité de service (QoS)**

Ces protocoles utilisent des méthodes d'établissement de chemins qui prennent en compte la qualité de service [28]. Ils visent à garantir des performances réseau satisfaisantes en termes de délais fiables, répondant aux exigences spécifiques de l'application. Ces protocoles sont principalement utilisés dans des contextes industriels et militaires. Parmi ces protocoles, on peut citer le protocole SAR (Sequential Assignment Routing) et GEAR.

### **3.2.2. Protocoles de routage basés sur la négociation**

Les protocoles basés sur la négociation utilisent des descripteurs de données de haut niveau pour éliminer les transmissions redondantes grâce à des processus de négociation. Les décisions de communication sont prises en fonction des ressources disponibles. Les protocoles de la famille SPIN illustrent cette approche de routage basée sur la négociation. Ces protocoles sont spécifiquement conçus pour diffuser des données provenant d'un capteur à tous les autres capteurs, en considérant que ces capteurs peuvent potentiellement jouer le rôle de stations de base. Par conséquent, le concept central de ce type de routage consiste à éliminer les informations en double et à prévenir l'envoi de

données redondantes vers le capteur suivant ou la station de base en procédant à une séquence de messages de négociation avant de commencer la transmission des données réelles [28].

### **3.2.3. Protocoles de routage multi-chemin**

Les protocoles de routage multi-chemin exploitent la notion de plusieurs chemins plutôt que de se limiter à un seul chemin, dans le but d'améliorer les performances du réseau. La tolérance aux pannes est évaluée en termes de capacité à identifier des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin principal. Parmi les protocoles couramment utilisés dans cette catégorie figure le protocole Direct Diffusion [28].

### **3.2.4. Protocoles basés sur les interrogations**

Dans cette catégorie de routage, les nœuds de destination lancent une demande de données, également appelée "tâche de découverte" ou "tâche de détection", à partir d'un nœud spécifique. Cette demande est ensuite transmise à travers le réseau. Un nœud qui possède les données correspondantes répond alors en renvoyant les données au nœud émetteur de la demande. Généralement, ces requêtes sont formulées en langage naturel ou en langage de requête de haut niveau. Les protocoles de routage tels que Directed Diffusion et Rumor routing sont des exemples de protocoles qui utilisent cette approche basée sur les interrogations [28].

## **3.3. Protocoles de routage basés sur l'établissement de la route dans les RCSF**

### **3.3.1. Protocoles Proactifs**

Les protocoles de routage proactifs représentent une catégorie de routage ad-hoc dans laquelle chaque nœud du réseau s'efforce d'établir et de maintenir constamment des tables de routage valides. Ainsi, ces protocoles proactifs échangent des informations de routage de manière continue, même en l'absence de demandes de transfert de données. Pour résumer, les performances du routage proactif se caractérisent par les éléments suivants [29] :

- Les latences les plus réduites, car les applications émettrices peuvent présumer de l'existence de routes actualisées et validées.
- Une consommation d'énergie et une utilisation de la bande passante importantes, résultant de l'utilisation permanente du protocole de mise à jour des routes, même lorsque les routes ne sont jamais exploitées.
- Une utilisation considérable de la mémoire vive, en raison de la nécessité de conserver à long terme les tables de routage, y compris pour les routes peu ou pas utilisées.

Parmi les autres protocoles proactifs, on retrouve notamment : DSDV (Destination Sequenced Distance Vector), OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) et FSR (Fisheye State Routing).

### **3.3.2. Protocoles réactifs**

Les protocoles de routage relevant de cette catégorie sont conçus pour établir et maintenir des routes à la demande, en fonction des besoins spécifiques. Lorsqu'une source nécessite une route, une procédure de découverte de routes à l'échelle du réseau est initiée. Les protocoles DSR (Dynamic Source Routing) et AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) sont des exemples de protocoles réactifs [30].

### **3.3.3. Protocoles hybrides**

Les protocoles hybrides sont caractérisés par l'utilisation d'une combinaison des approches proactives et réactives dans leur fonctionnement [31].

## **4. Quelques exemples de protocoles de routage**

### **4.1. LEACH**

Le protocole de routage hiérarchique LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) a été proposé par W.R. Heinzelman et ses collaborateurs pour réduire la perte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce protocole est fondé sur un mécanisme de clustering simple, qui permet d'économiser l'énergie en choisissant des têtes de cluster pour transmettre les données, au lieu des autres nœuds [32].

#### **4.1.1. Fonctionnement de base du protocole LEACH**

Le protocole de routage hiérarchique LEACH est structuré en tours, avec chaque tour ayant une durée équivalente et prédéterminée. Ainsi, le fonctionnement de l'algorithme se décompose en deux phases principales : la phase d'initialisation et la phase de transmission.

La phase d'initialisation est généralement plus longue que la phase set-up, car cela permet de réduire les coûts généraux associés à l'exécution du protocole [33].

##### **a) Phase d'initialisation**

Pendant cette phase, chaque nœud dans le réseau de capteurs décide s'il doit se transformer pour devenir le cluster head (CH) pour le tour en cours. Cette décision repose sur un nombre aléatoire généré par chaque nœud, compris entre 0 et 1. Si la valeur aléatoire est inférieure à un seuil  $T(n)$ , alors le nœud

est choisi pour être le cluster head pour le tour actuel. La valeur de seuil est déterminée par l'expression suivante :

$$T(\mathbf{n}) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P^{*(r \bmod \frac{1}{p})}} & \text{Si } \mathbf{n} \in G \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec les coefficients utilisés par cet algorithme sont les suivants :

**p** : le pourcentage de nœuds qui souhaitent devenir cluster-heads.

**r** : le numéro du round actuel.

**G** : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été sélectionnés comme cluster-heads au cours des 1/P dernières périodes.

Lorsque le chef de cluster est sélectionné, il utilisera le protocole CSMA MAC pour annoncer son statut, puis les nœuds restants prendront la décision concernant leur chef de cluster pour le tour en cours en fonction de la force du signal reçu du message publicitaire. Avant le début de la phase d'initialisation permanente, certains paramètres tels que la topologie du réseau et les coûts relatifs de calcul par rapport à la communication sont pris en compte. Pour terminer les messages vers le cluster head (CH), puis vers le chef de cluster vers la station de base, un programme d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) est appliqué à tous les membres du groupe de cluster. Dès qu'un cluster head est sélectionné pour une région, la phase d'initialisation permanente démarre. La phase d'initialisation permanente est précédée d'une phase d'initialisation, qui se déroule en deux étapes : la première étape consiste en la sélection de cluster head et la deuxième étape consiste en l'attribution des membres du cluster à leur chef de cluster. La phase d'initialisation permanente est longue par rapport à la phase d'initialisation pour minimiser les frais généraux [34]. L'organigramme de la phase d'initialisation permanente est présenté dans la figure 2.4 :

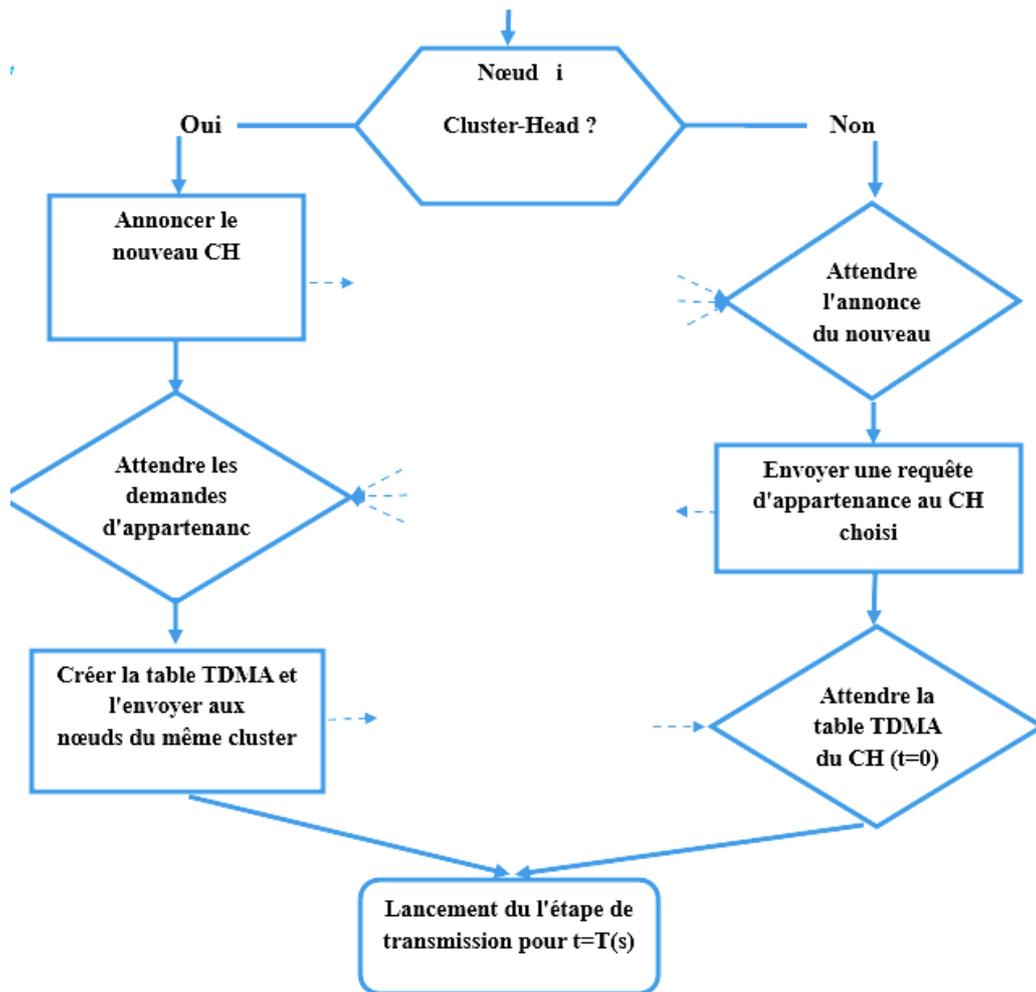


Figure 2. 4 : Structure de l'algorithme de formation de clusters distribué pour LEACH [35].

### b) Phase de transmission

Au cours de cette étape, le protocole LEACH utilise une approche TDMA pour permettre à chaque nœud membre du groupe de transmettre ses données perçues au chef de groupe. Chaque chef de groupe élabore et distribue un horaire qui assigne un moment précis à chaque membre du groupe pour communiquer ses données [36].

Après que chaque nœud a reçu le programme de transmission établi par le chef de groupe, ils utilisent le temps qui leur a été attribué pour transmettre les données captées au chef de groupe. Ensuite, le chef de groupe exécute des algorithmes de fusion de données pour agréger les données reçues et réduire la quantité d'informations transmises à la station de base.

#### 4.1.2. Avantages et inconvénients de LEACH

Le protocole LEACH présente plusieurs avantages en termes de prolongation de la durée de vie du réseau, de gestion efficace des ressources et de prise en compte des contraintes, notamment en matière de consommation d'énergie. Cependant, il présente également certaines limitations. Dans ce qui suit, nous présenterons certains de ses avantages et inconvénients [37] :

### a) Avantages

**Algorithme distribué :** l'autoconfiguration des clusters se fait de manière indépendante de la station de base (BS). Cela permet aux nœuds de former des clusters de manière autonome, sans nécessiter d'intervention de la BS, ce qui simplifie la gestion du réseau.

**Rotation des rôles de cluster-heads :** les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster, ce qui évite de consommer beaucoup d'énergie pour la transmission des données.

**Faible énergie pour l'accès au média :** grâce au mécanisme de clustering, les nœuds peuvent communiquer sur de courtes distances avec leurs CHs. Cela permet une utilisation optimisée des médias avec une gestion locale au niveau du cluster, ce qui réduit les interférences et les collisions et contribue aux économies d'énergie.

**Agrégations des données :** les CHs compriment les données provenant des nœuds membres de leur cluster et envoient un paquet agrégé au nœud récepteur. Cette agrégation permet de réduire la quantité d'informations qui doivent être transmises au nœud récepteur, simplifiant ainsi l'algorithme de routage, optimisant la gestion du réseau, réduisant la consommation d'énergie et améliorant l'évolutivité du réseau.

### b) Inconvénients

**Absence des CHs :** il est possible de ne pas avoir de CHs pendant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité  $P$ .

**La distance entre les CHs et les autres nœuds :** les nœuds les plus éloignés des CHs se déchargent rapidement par rapport aux nœuds les plus proches.

**Réduction de l'énergie de nœuds :** cette réduction est due à l'utilisation d'une communication en une seule étape au lieu d'une communication en plusieurs étapes.

**La rotation des CHs :** cette méthode n'est pas efficace pour les grandes structures de réseaux en raison de la surcharge opérationnelle causée par l'altération des CHs, ce qui réduit le gain d'énergie initial.

**Sécurité :** le protocole LEACH n'est pas sécurisé. Aucun mécanisme de sécurité n'est intégré à ce protocole, ce qui le rend vulnérable aux attaques. Par conséquent, un attaquant peut facilement monopoliser le réseau et provoquer son dysfonctionnement

### 4.2. PEGASIS

Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems (PEGASIS), ce protocole est une amélioration du protocole LEACH. PEGASIS adopte une approche basée sur la formation de chaînes au lieu de clusters de nœuds de capteurs, permettant à chaque nœud de transmettre et de recevoir des données uniquement de ses voisins directs. Un seul nœud est sélectionné dans cette chaîne pour effectuer la transmission à la station de base [38]. L'idée centrale de PEGASIS réside dans l'utilisation de tous les nœuds pour transmettre ou recevoir des données avec leurs voisins les plus proches. Les données sont transférées de nœud en nœud jusqu'à ce qu'elles atteignent finalement la station de base, où elles sont agrégées [39].

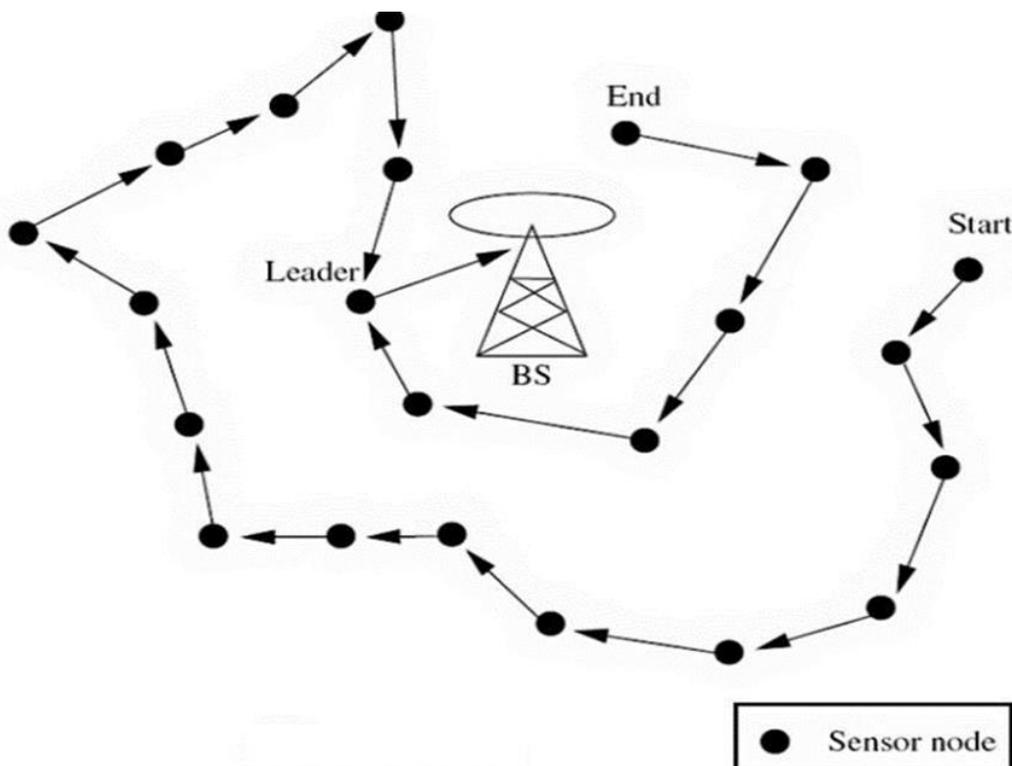


Figure 2. 5 : Illustration de protocole PEGASIS [40].

### 4.3. Les protocoles de routage TEEN et APTEEN

Les protocoles de routage « TEEN » (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) et « APTEEN » (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

sont spécifiquement conçus pour des applications critiques et importantes. Ces deux protocoles mettent l'accent sur la valeur des attributs mesurés en tant que facteur clé [41].

APTEEN offre une fonctionnalité supplémentaire permettant de modifier le cycle et les paramètres du protocole TEEN en fonction des besoins spécifiques de l'utilisateur et de l'application. Le protocole TEEN a été développé pour être sensible aux changements soudains des propriétés, tels que la température. Cette réactivité est essentielle pour les applications critiques où le réseau doit fonctionner de manière réactive. L'architecture des réseaux de capteurs repose sur la formation de groupes hiérarchiques, où les nœuds se regroupent en clusters. Ce processus est répété jusqu'à ce que la station de base soit atteinte [42].

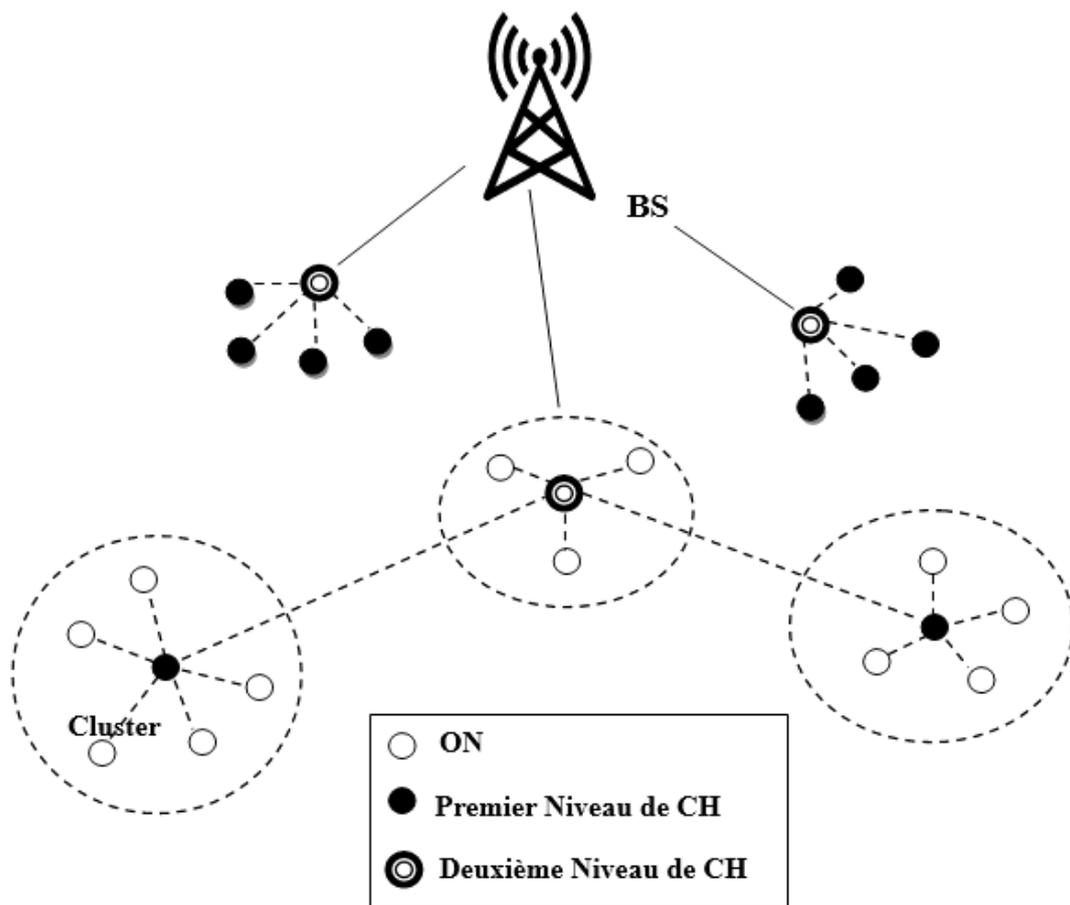


Figure 2. 6 : Regroupement hiérarchique dans les protocoles TEEN et APTEEN [43].

## **5. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la définition du routage ainsi qu'à l'étude de la classification des protocoles de routage en considérant trois critères essentiels : la structure du réseau, l'établissement de la route et le type de protocole. En outre, nous avons présenté trois protocoles hiérarchiques largement répandus, à savoir LEACH, PEGASIS, TEEN et APTEEN.

Ces protocoles ont été spécifiquement conçus pour améliorer les performances des réseaux de capteurs sans fil en optimisant l'efficacité énergétique et en prolongeant la durée de vie des nœuds, tout en répondant aux exigences spécifiques des applications des capteurs sans fil. La maîtrise de ces protocoles permettra aux chercheurs d'appliquer les meilleures pratiques et de concevoir des solutions plus performantes pour les réseaux de capteurs sans fil.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de simulation du protocole LEACH ainsi que variante nommée LEACH-MOD.

## **Chapitre 3**

### **Notre contribution, Simulation et Résultats**

## 1. Introduction

La durabilité des réseaux de capteurs repose principalement sur une gestion efficace de l'énergie. Chaque nœud doit être conçu pour optimiser l'utilisation de ses ressources énergétiques afin de maximiser la durée de vie globale du réseau. Au fil des décennies, plusieurs protocoles de routage économes en énergie ont été développés spécifiquement pour les réseaux de capteurs. L'objectif principal de ces protocoles est de trouver des itinéraires à faible consommation d'énergie, optimisant ainsi la durée de vie du réseau. Pour atteindre cet objectif, diverses stratégies ont été employées dans le développement de ces protocoles, conduisant à des chemins efficaces.

Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats de simulations et d'expérimentations obtenus lors de la mise en œuvre de deux protocoles de routage, à savoir LEACH et LEACH-MOD, qui reposent sur une approche de clustering. L'objectif est de démontrer l'efficacité de ces protocoles en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau. Nous commencerons par une description détaillée du modèle d'énergie utilisé pour la simulation des protocoles, puis nous justifierons le choix du simulateur qui a été employé. Enfin, nous procéderons à l'interprétation des résultats obtenus.

## 2. Modèle Énergétique utilisé

Le modèle énergétique adopté pour cette étude est celui proposé par Heinzelman et al, qui est considéré comme une référence dans le domaine [44]. Selon ce modèle, la consommation d'énergie est subdivisée en deux composantes distinctes, à savoir l'énergie de réception ( $E_{Rx}$ ) et l'énergie de transmission ( $E_{Tx}$ ), comme illustré dans la figure 3.1.

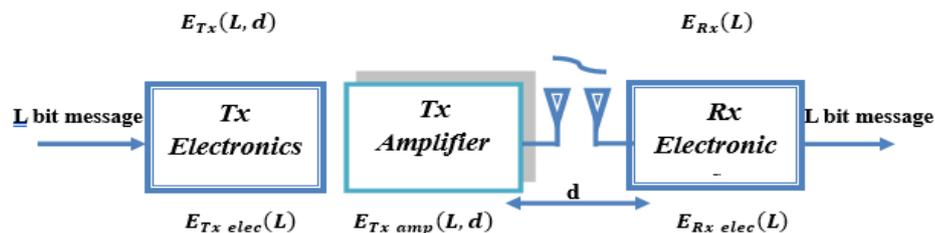


Figure 3. 1 : Schéma de déperdition énergétique [44].

Afin de recevoir un message composé de 'L' bits, le dispositif récepteur nécessite une quantité d'énergie définie par :  $E_{Rx}(L) = L * E_{elec}$

De manière similaire, lors de la transmission d'un message constitué de 'L'bits sur une distance 'd' donnée, le dispositif émetteur consomme une quantité d'énergie définie par l'équation (3.1) [44].

$$E_{TX}(L, d) = \left\{ \begin{array}{ll} L * E_{elec}(L, d) + L * \varepsilon_{fs} * d^2 & d \leq d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \varepsilon_{mp} * d^4 & d > d_0 \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Avec :

$E_{elec}$ : représente l'énergie requise pour la transmission ou la réception d'un seul bit dans le contexte étudié.

$\varepsilon_{fs}$ : facteur d'amplification, correspond au modèle de propagation dans l'espace libre (free space propagation).

$\varepsilon_{mp}$ : facteur d'amplification, correspond au modèle de propagation à trajets multiples atténués (multipath fading propagation).

$L$ : la variable  $L$  désigne la taille du message en bits.

$d$ : représente la distance entre l'émetteur du récepteur.

$d_0$ : le seuil  $d_0$  indique la distance critique à laquelle les facteurs d'amplification subissent un changement de valeur.

Selon l'équation (3.1), lorsque la distance  $d$  dépasse ce seuil  $d_0$ , le modèle de propagation à trajets multiples (mp) est utilisé, tandis que pour les distances inférieures à  $d_0$ , le modèle de propagation dans l'espace libre (fs) est appliqué.

La valeur de «  $d_0$  » est évaluée à partir de l'expression au-dessus, qui dépend des facteurs d'amplification fs mentionnés précédemment  $d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}$ .

### 3. Notre solution

Dans cette section nous allons présenter notre contribution afin d'améliorer la consommation d'énergie dans un RCSF.

Nous avons choisi de modifier le protocole LEACH, qui est un protocole à base du clustering. Notre contribution est autour la modification de la condition de sélection des chefs de groupes. Cette opération est très importante. Parce que les chefs de groupe jouent le rôle d'un intermédiaire entre les capteurs et la station de base. La sélection des chefs de groupe se fait d'une manière itérative. Donc, chaque capteur possède la possibilité d'être un chef de groupe. Avec cette stratégie la consommation d'énergie sera équitable entre tous les capteurs.

La sélection des chefs de groupe est assurée par l'équation suivante dans notre contribution :

Equation de section des chefs de groupe

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*(r \bmod \frac{1}{p})} * Er(i) & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.2)$$

**Sachant que :**  $p$  est le pourcentage de nœuds qui souhaitent devenir cluster-heads,  $r$  est le numéro du round actuel,  $G$  est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été sélectionnés comme cluster-heads au cours des  $1/P$  dernières périodes et  $Er(i)$  est l'énergie résiduelle de chacun des nœuds.

Après la sélection des chefs de groupe les capteurs commencent transmission des données vers la station de base. La transmission sera assurée par les chefs de groupe. Afin de comprendre le fonctionnement de notre contribution, la figure suivante illustre le fonctionnement de notre contribution : Notre contribution a été nommée LEACHMOD.

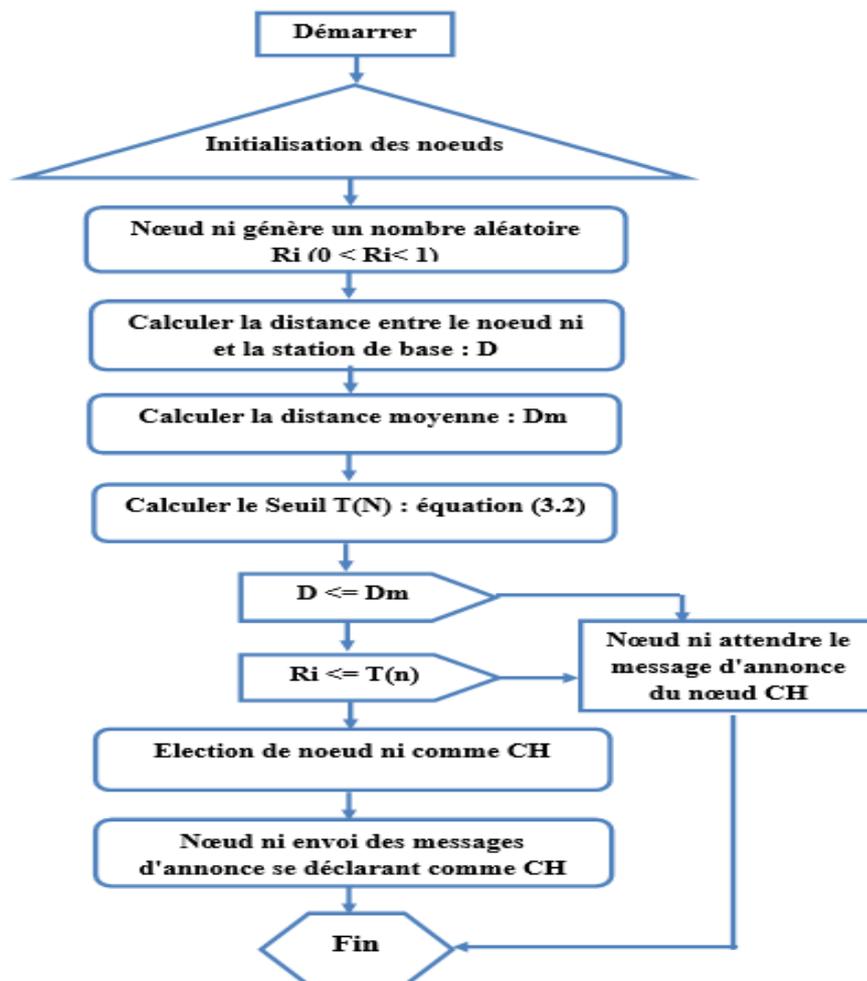


Figure 3. 2 : Organigramme de sélection des chefs de groupe LEACHMOD.

## **4. Environnement de travail**

### **4.1. Présentation de simulateur “Matlab”**

Dans le cadre de la présente étude, nous avons choisi d'utiliser le langage de programmation MATLAB pour appliquer notre approche. Développé par la société The MathWorks, MATLAB a été spécifiquement conçu pour répondre aux exigences des problèmes scientifiques et techniques. En tant que langage basé sur les matrices, MATLAB combine les domaines des mathématiques, de la modélisation graphique et de la programmation [45]. Il offre une vaste bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites, caractérisées par des notations simples mais puissantes, qui permettent d'effectuer de nombreuses tâches de calcul courantes. Ces fonctions peuvent être intégrées dans différents langages de programmation et MATLAB facilite leur accessibilité en les regroupant dans un environnement unifié. Pour nos simulations, nous utiliserons la version R2019b de MATLAB.

Les caractéristiques techniques de la machine utilisée pour les simulations figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3. 1 : Caractéristiques matérielles de la machine utilisée pour la simulation

<b>Hardware</b>	<b>Caractéristiques</b>
Processeur	AMD A8-7410 APU with AMD Radeon R5 Graphics 2.20GHZ
Mémoire RAM	8.00 Go
Système d'exploitation	Microsoft Windows 10 64 bits

### **4.2. Exposition de l'interface d'application**

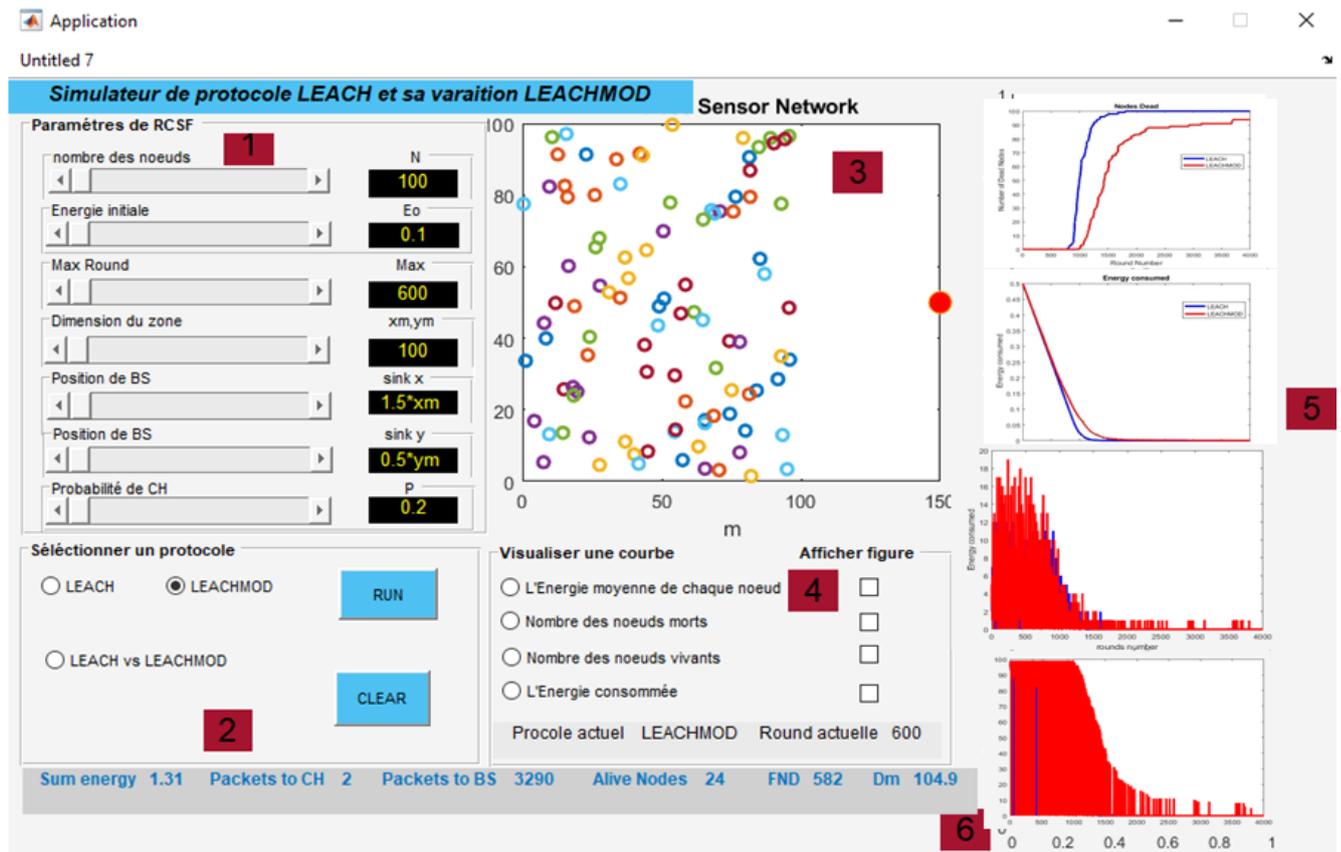


Figure 3. 3 : L'interface de l'application de simulation

L'interface de l'application de simulation est constituée de six composants partis, comme indiqué dans la figure 3.3

**Partie 1 :** Paramètres du réseau de capteurs sans fil (RCSF) :

Dans cette section, nous présentons les divers paramètres nécessaires pour exécuter la simulation, tels que le nombre de nœuds (n), l'énergie initiale (Eo). En outre, deux boutons sont disponibles : "RUN" pour exécuter la simulation et "CLEAR" pour réinitialiser tous les axes et champs, permettant ainsi de démarrer une nouvelle exécution.

**Partie 2 :** Sélection du protocole :

Cette partie offre la possibilité de choisir parmi les différents protocoles à simuler : LEACH, LEACH-MOD, LEACH vs LEACH-MOD.

**Partie 3 :** Visualisation des courbes et affichage des figures :

Au sein de cette partie, les différentes courbes à visualiser sont proposées, telles que l'énergie moyenne de chaque nœud, le nombre de nœuds morts, le nombre de nœuds vivants, l'énergie consommée. De plus, des informations sur le protocole et le round en cours d'exécution sont affichées. Afin d'obtenir une figure représentant l'une de ces courbes, permettant de réaliser des sauvegardes, des impressions ou d'obtenir les coordonnées (x, y) d'un point précis, il suffit de cocher la case correspondante avant de lancer l'exécution.

### **Partie 4 : Axe de Visualisation :**

Cette partie présente l'axe qui affiche les différentes étapes de la simulation.

### **Partie 5 : Axes de Visualisation des Courbes :**

Cette partie comprend les différents axes qui affichent les courbes au fur et à mesure de la simulation.

### **Partie 6 : Barre des Indicateurs :**

Dans cette partie, nous trouvons les divers indicateurs de simulation qui contribuent à l'analyse de la simulation, tels que l'énergie consommée, le nombre de paquets envoyés vers les clusters heads, le nombre de paquets envoyés vers la station de base, le premier nœud mort, le nombre de nœuds vivants et la distance moyenne spécifique au protocole LEACH-MOD uniquement.

### **4.3. Les paramètres de simulation**

Dans le cadre de cette simulation, un réseau constitué de 100 nœuds est utilisé de manière aléatoire. Chaque message de données est composé de 4000 bits. Les valeurs des énergies de transmission et de réception sont préétablies à 50 nJ/bit, tandis que l'énergie associée au modèle de propagation en espace libre est de 10 pJ/bit/m<sup>2</sup> pour les distances inférieures à 87 m et de 0.0013 pJ/bit/m<sup>4</sup> pour les distances supérieures à 87 m. Par ailleurs, l'énergie nécessaire pour l'agrégation des données est fixée à 5 nJ/bit/signal. En ce qui concerne l'énergie initiale attribuée à chaque nœud utilisé dans la simulation, elle est établie à 0,5 Joule.

Les paramètres de simulation sont exposés de manière détaillée dans le tableau suivant :

Tableau 3. 2 : Les paramètres détaillés de simulation

<b>Notation</b>	<b>Description</b>	<b>Valeur</b>
M	La surface de la zone surveillée	$100*100m^2 / 200*200m^4$
L	La taille du paquet de données	4000 Bits
N	Le nombre de noeud capteur	100
$E_0$	L'Énergie initiale	0.5 J
Sink.x, Sink.y	L'emplacement de la station de base	(50,50) ; (150,50)
$E_{DA}$	Le Data agrégation Énergie	$5*10^{-9}$ J/bit
P	La probabilité du cluster head	0.05; 0.07; 0.2
$\epsilon_{fs}$	La modèle de propagation en espace libre	10 pJ/bit/ $m^2$
$\epsilon_{mp}$	Le modèle de propagation multipath	0.0013 pJ/bit/ $m^4$
$D_0$	La distance limite	87 m
$R_{max}$	Le round Max	4000

#### **4.4. Métriques de performances**

Afin d'évaluer l'efficacité énergétique des protocoles examinés, nous procéderons à une comparaison des résultats de simulation entre le protocole LEACH et sa version modifiée, LEACH-MOD. Notre analyse se concentrera principalement sur trois indicateurs de performance : la durée de vie du réseau, le nombre des nœuds actifs et la consommation énergétique. Ces mesures nous permettront d'évaluer et de comparer l'efficacité des deux protocoles en termes d'utilisation énergétique optimale et de maintien de la connectivité dans le réseau.

##### **a) Durée de vie**

Dans le cadre de cette étude, il est primordial que chaque capteur gère de manière optimale ses ressources énergétiques afin de maintenir le réseau en état de fonctionnement. Ainsi, la durée de vie du réseau est définie comme la période temporelle s'écoulant depuis le début de l'activité du réseau jusqu'à l'apparition du premier nœud défaillant.

### **b) État des nœuds**

Nous avons procédé à l'évaluation du nombre de nœuds actifs et inactifs dans le réseau au fil du temps pour chaque protocole étudié.

### **c) Consommation énergétique moyenne par nœud**

Nous avons effectué le calcul de la consommation énergétique moyenne pour chaque nœud du réseau.

### **d) L'énergie consommée**

Nous avons effectué le calcul de l'énergie consommée en fonction de la quantité d'énergie consommée par chaque nœud du réseau.

## **4.5. Comparaison des résultats de simulation**

### **4.5.1. Première comparaison**

Dans cette étude comparative, nous évaluons l'impact de la position de la station de base (BS) sur les deux protocoles, tout en maintenant une probabilité  $P$  fixe pour la sélection des nœuds cluster heads (CH) à  $P=0.05$ . Le nombre total de nœuds dans le réseau est fixé à  $N=100$ , et la zone de surveillance est définie par les dimensions  $X_m \times Y_m = 100m \times 100m$ . À chaque itération de la simulation, nous modifions la position de la station de base (BS) pour observer les variations de performances entre les protocoles.

#### **a) BS = 50,50**

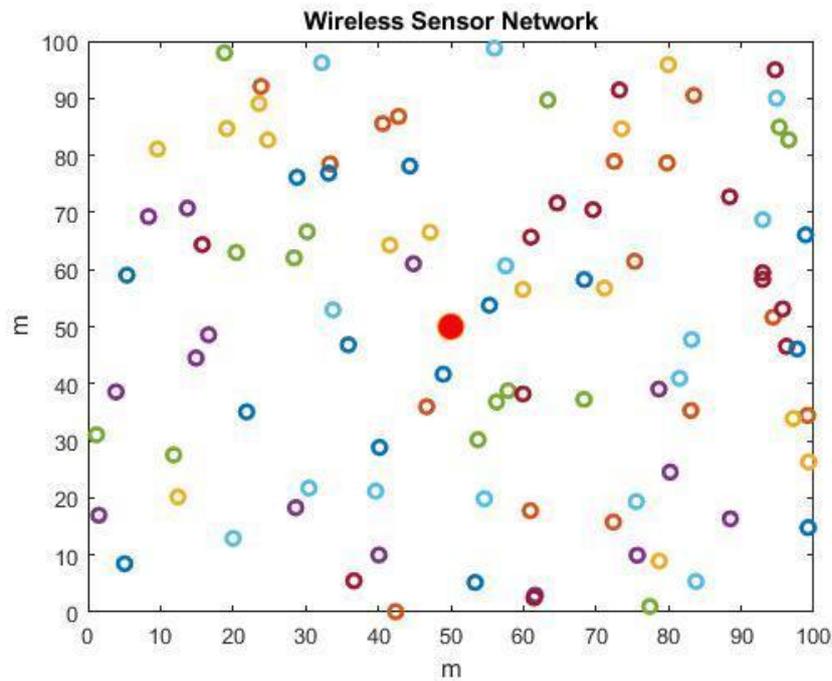


Figure 3. 4 : Distribution aléatoire des nœuds dans le déploiement sur BS (50,50)

La figure 3.4 illustre la disposition aléatoire des nœuds capteurs sur une surface de 100 m<sup>2</sup>, tandis que la station de base (BS) est positionnée au centre du réseau, à des coordonnées spécifiques (50,50).

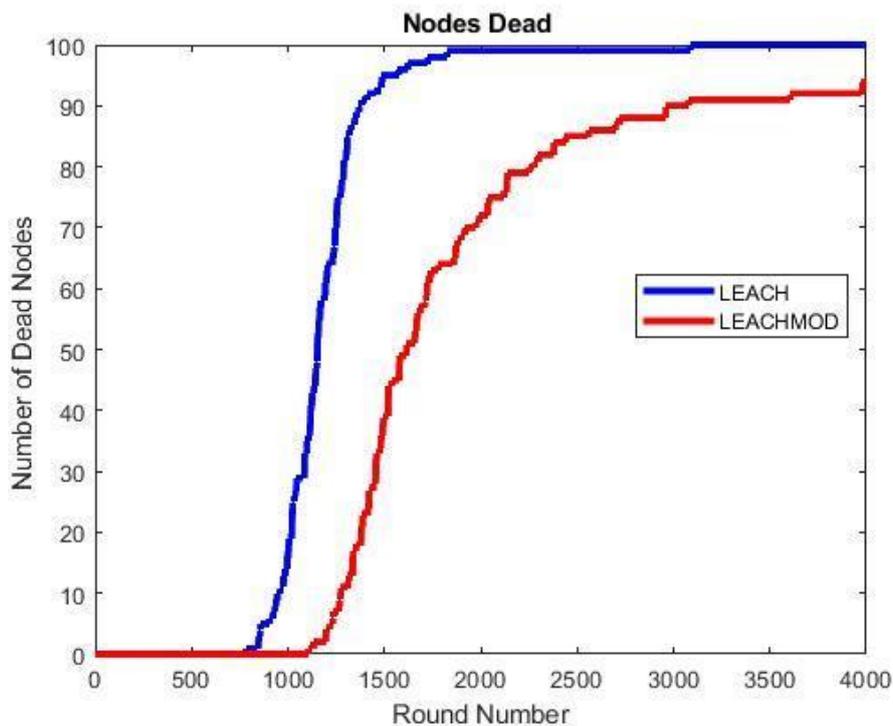


Figure 3. 5 : Comparaison du nombre de nœuds inactifs sur une période de 4000 rounds sur BS (50,50)

La figure 3.5 illustre la comparaison des nœuds inactifs entre le protocole LEACH-MOD et le protocole LEACH sur une période de 4000 rounds, en tenant compte de la position de la station de base (BS) à (50,50). Il est démontré que le protocole LEACH-MOD est plus performant en maintenant un plus grand nombre de nœuds actifs pendant une durée prolongée par rapport au protocole LEACH. Initialement, le protocole LEACH a réussi à maintenir les cent nœuds actifs pendant 827 rounds, mais après ce seuil, il a connu le premier nœud inactif. En revanche, le protocole LEACH-MOD a démontré une meilleure performance en maintenant les cent nœuds actifs jusqu'au cycle 1107. À la fin des 4000 rounds, le protocole LEACH-MOD a réussi à maintenir 10 nœuds actifs, tandis que le protocole LEACH n'a pu préserver aucun nœud actif. Cette amélioration de performance est attribuée à l'utilisation de l'énergie résiduelle des nœuds et à la considération de la distance par rapport à la station de base dans la sélection des chefs de cluster (CH) dans le cadre du protocole LEACH-MOD.

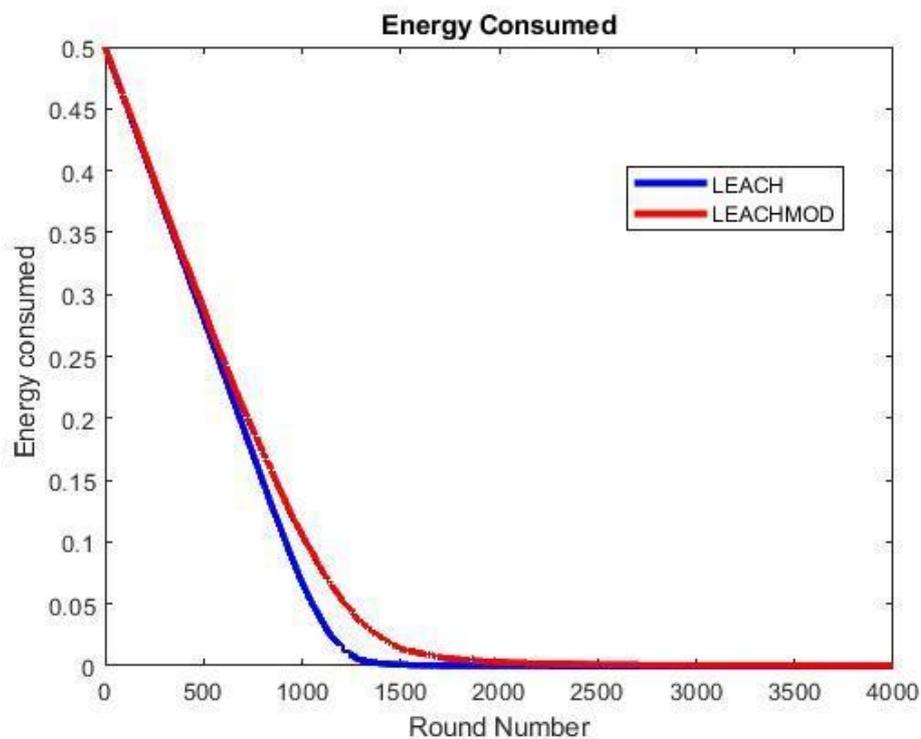


Figure 3. 6 : Comparaison d'énergie consommée sur une période de 4000 rounds sur BS (50,50)

La figure 3.6 présente une comparaison entre les deux protocoles en termes de somme d'énergie des nœuds à chaque tour. Le protocole LEACH-MOD se distingue par sa capacité à maintenir l'énergie totale pendant une plus longue période par rapport à LEACH. Lorsque la durée de la simulation est prolongée, la somme d'énergie du réseau diminue considérablement dans LEACH, tandis que LEACH-MOD parvient à maintenir une meilleure stabilité de la valeur. En effet, ce dernier protocole parvient à maintenir la somme d'énergie totale à 1,5 Joules jusqu'aux 4000 tours. En

revanche, dans le protocole LEACH, la valeur chute en dessous de 1 Joule après 1400 tours. Les résultats obtenus soulignent que le protocole LEACH-MOD proposé permet de réduire de manière plus significative la consommation d'énergie par rapport à LEACH. Cette amélioration est attribuée à l'utilisation judicieuse de l'énergie résiduelle des nœuds et à la prise en compte de l'éloignement par rapport à la station de base lors de la sélection des chefs de cluster (CH).

**b) BS = 150,50**

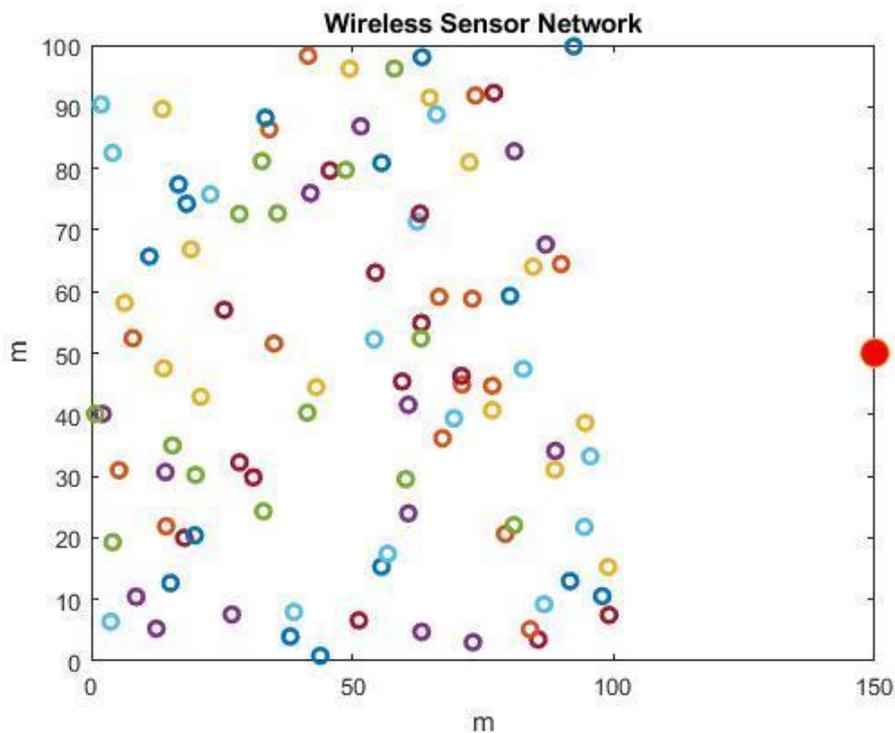


Figure 3. 7 : Illustration des déploiements des nœuds capteurs dans le réseau sur BS (150,50)

La figure 3.7 présente la configuration aléatoire de déploiement des nœuds capteurs dans une surface de surveillance de 100 m<sup>2</sup>, avec la station de base (BS) située à la position (150,50).

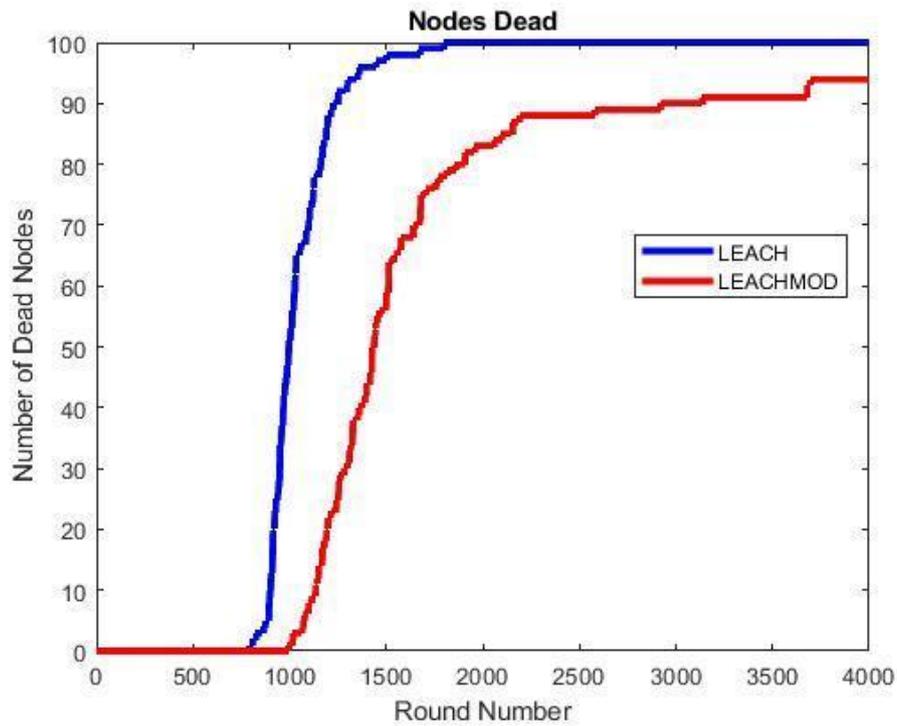


Figure 3. 8 : Comparaison du nombre de nœuds inactifs sur une période de 4000 rounds sur BS (150,50)

La figure 3.8 présente une comparaison des nœuds morts entre deux protocoles sur une période de 4000 rounds, en modifiant la position de la station de base (BS) à (150,50). Une dégradation remarquable est observée en ce qui concerne le premier nœud mort dans tous les protocoles étudiés est met en évidence la figure 3.9.

**LEACH : de 827 à 792 tours.**

**LEACH-MOD : de 1107 à 992 tours.**

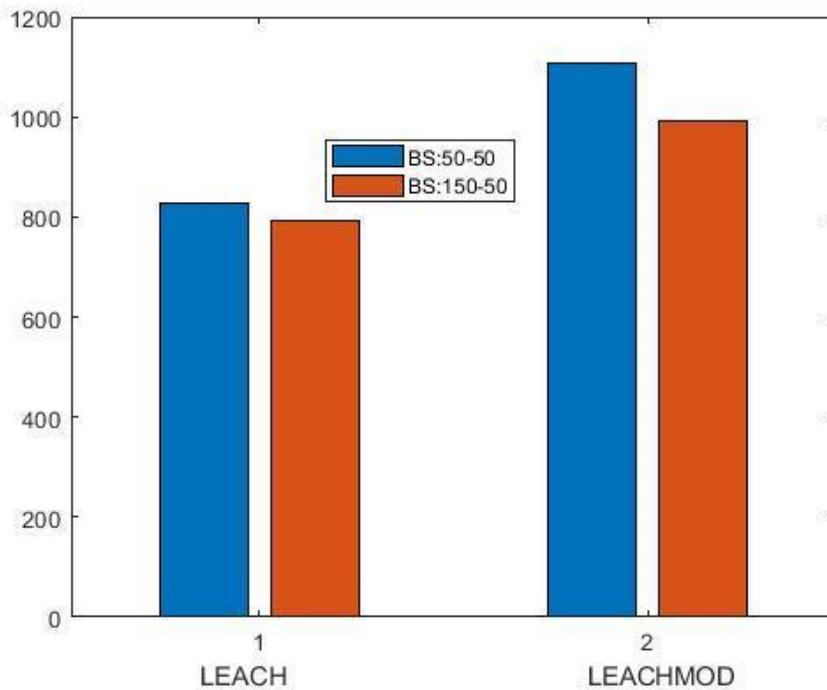


Figure 3. 9 : Comparaison de première nœud mort selon la position de BS

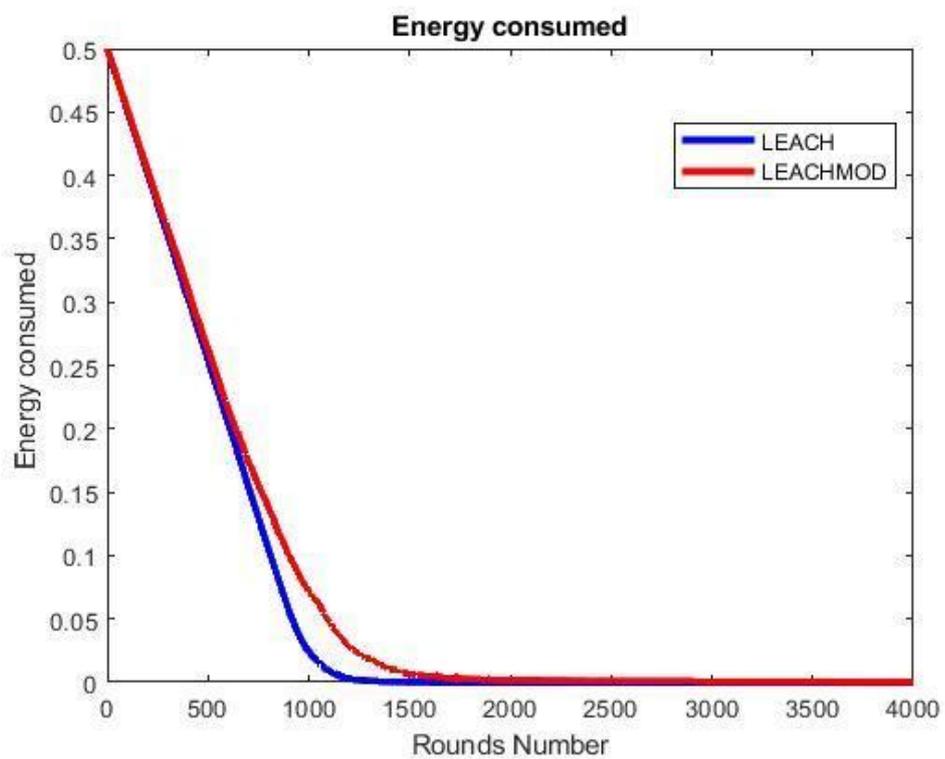


Figure 3. 10 : Comparaison de l'énergie consommée sur une période de 4000 rounds sur BS (150,50)

La figure 3.10 illustre la comparaison des deux protocoles en termes de la somme de l'énergie des nœuds pour chaque tour. Une observation révèle une stabilité dans les résultats, avec le protocole LEACH-MOD surpassant toujours le protocole LEACH en termes de consommation énergétique.

### Résumé de la première comparaison étudiée

L'emplacement de la station de base (BS) a une influence importante sur les performances des protocoles LEACH et LEACH-MOD, tel que démontré par :

**Couverture du réseau :** l'emplacement de la station de base détermine la capacité du réseau de capteurs sans fil pour couvrir la zone d'intérêt. La planification stratégique de l'emplacement de la station de base permet de réduire au minimum les zones qui ne sont pas couvertes et améliore la connectivité entre les capteurs. Une meilleure couverture du réseau améliore la fiabilité des communications et réduit la perte de données.

**Qualité de la communication :** la position de la station de base peut avoir une influence sur la qualité de la communication entre la station de base et les nœuds réseau. Une position adaptée réduit la distance de transmission entre les nœuds et la station de base, ce qui peut réduire le brouillage et améliorer la qualité du signal. Une meilleure qualité de communication permet de mieux recevoir les données et de réduire les erreurs de transmission.

**Consommation d'énergie :** la position de la station de base peut également avoir une incidence sur la consommation d'énergie des nœuds de réseau. Le déplacement de la station de base plus près des nœuds réduit la distance de transmission nécessaire pour atteindre la station de base. Cela permet de communiquer plus efficacement et de réduire la consommation d'énergie. En conséquence, une station de base bien positionnée peut aider à prolonger la durée de vie du réseau en réduisant la consommation énergétique globale des nœuds.

### 4.5.2. Deuxième Comparaison

Cette deuxième comparaison vise à étudier l'impact de la surface de surveillance  $X_m$ ,  $Y_m$  sur les deux protocoles. La probabilité  $P$  de sélectionner un chef de cluster (CH) est fixée à  $P=0,05$ , le nombre de nœuds  $N$  est maintenu à  $N=100$ , et la position de la station de base BS est fixée à  $BS = 50,50$ . Nous modifions la surface de surveillance en :

❖  **$X_m, Y_m = 200m * 200m$**

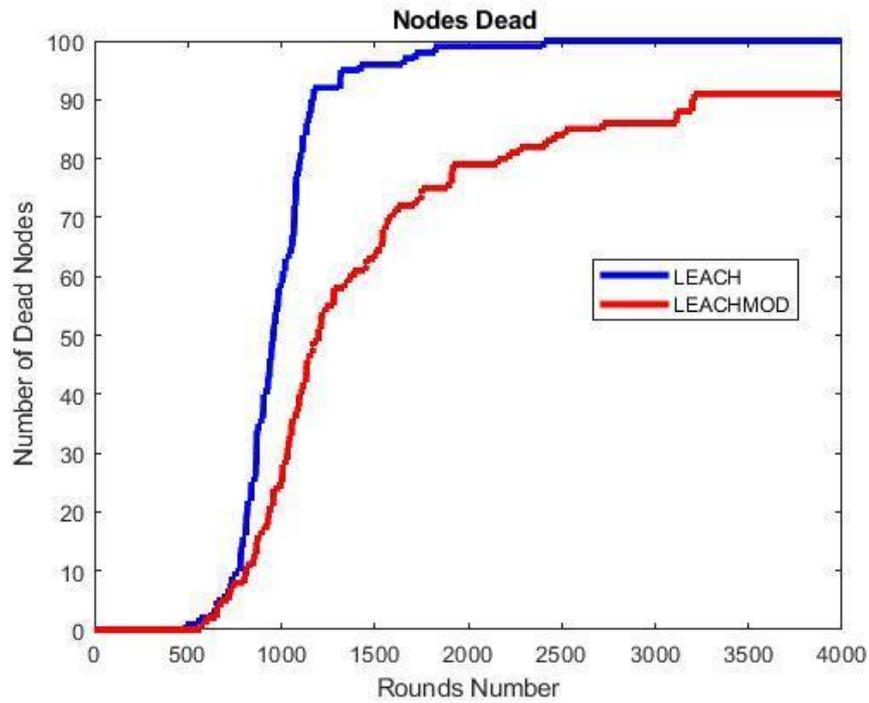


Figure 3. 11 : Comparaison des nœuds morts sur 4000 rounds sur  $200 \times 200 \times 2$

La figure 3.11 présente la comparaison des nœuds morts des deux protocoles dans une zone de surveillance de  $200 \times 200 \text{m}^2$ . Comme précédemment observé, une dégradation significative est observée en ce qui concerne le premier nœud mort pour tous les protocoles, comme le met en évidence la figure 3.9 (b).

**LEACH : de 827 à 492 tours.**

**LEACH-MOD : de 1107 à 573 tours.**

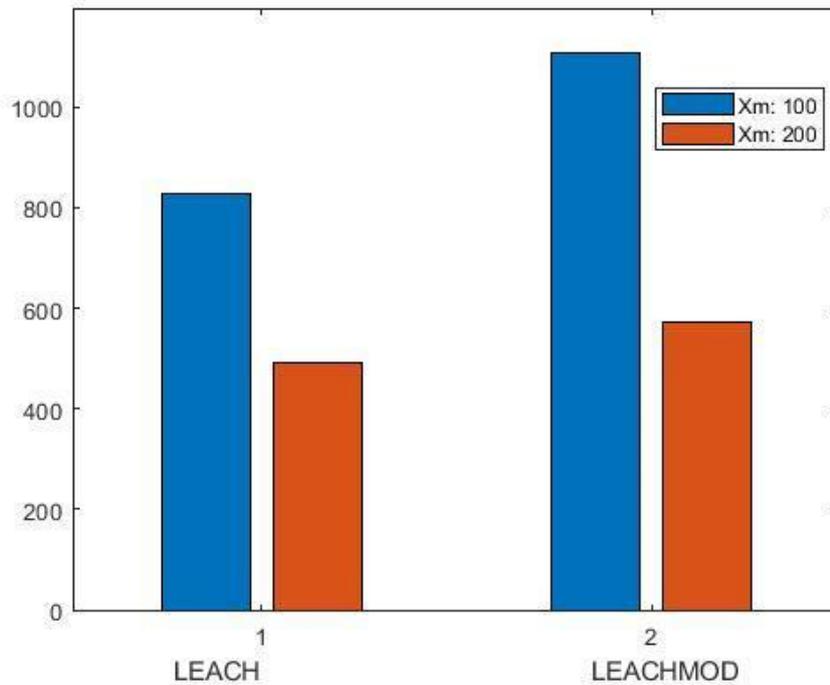


Figure 3. 12 : Comparaison de premier nœud mort selon la surface se surveillance ( $X_m$ ,  $Y_m$ )

### Résumé de la deuxième comparaison étudiée

La surface de la zone surveillée a une influence sur les performances des protocoles LEACH et LEACH-MOD. Voici comment la modification de la surface de la zone surveillée peut affecter les résultats obtenus :

**Communication à longue portée :** une surface de zone surveillée plus grande peut exiger des communications à plus longue portée entre les nœuds et la station de base. Cela peut se traduire par une plus grande consommation d'énergie pendant les transmissions, car les nœuds devront utiliser une plus grande puissance pour atteindre la station de base. Par conséquent, il est possible de réduire la durée de service du réseau.

**Répartition de la charge :** une zone surveillée plus grande peut permettre une meilleure répartition de la charge de travail entre les nœuds. Les nœuds peuvent être répartis de manière plus uniforme dans cette zone, ce qui permet de réduire la charge de chaque nœud individuel. Cela peut contribuer à prolonger la durée de vie du réseau en évitant que certains nœuds ne s'épuisent plus rapidement que d'autres.

**Utilisation efficace de l'énergie :** une zone surveillée plus grande peut offrir une opportunité d'utiliser l'énergie de manière plus efficace. Par exemple, en utilisant des protocoles de routage

adaptés, il est possible de mettre en place des mécanismes de transmission de données plus efficaces sur de plus longues distances. Cela peut permettre une meilleure utilisation de l'énergie disponible et donc prolonger la durée de vie du réseau.

#### 4.5.3. Troisième comparaison

Dans cette troisième comparaison, nous étudions l'impact de la probabilité  $P$  de sélection des chefs de cluster (CH) sur les deux protocoles. Le nombre de nœuds est fixé à  $N=100$ , la position de la station de base est maintenue à  $BS = 50,50$ , et la surface de surveillance est de  $X_m, Y_m = 100m \times 100m$ . À chaque itération, nous modifions la valeur de  $P$  afin d'analyser son influence sur les performances des protocoles.

##### a) $P=0.07$

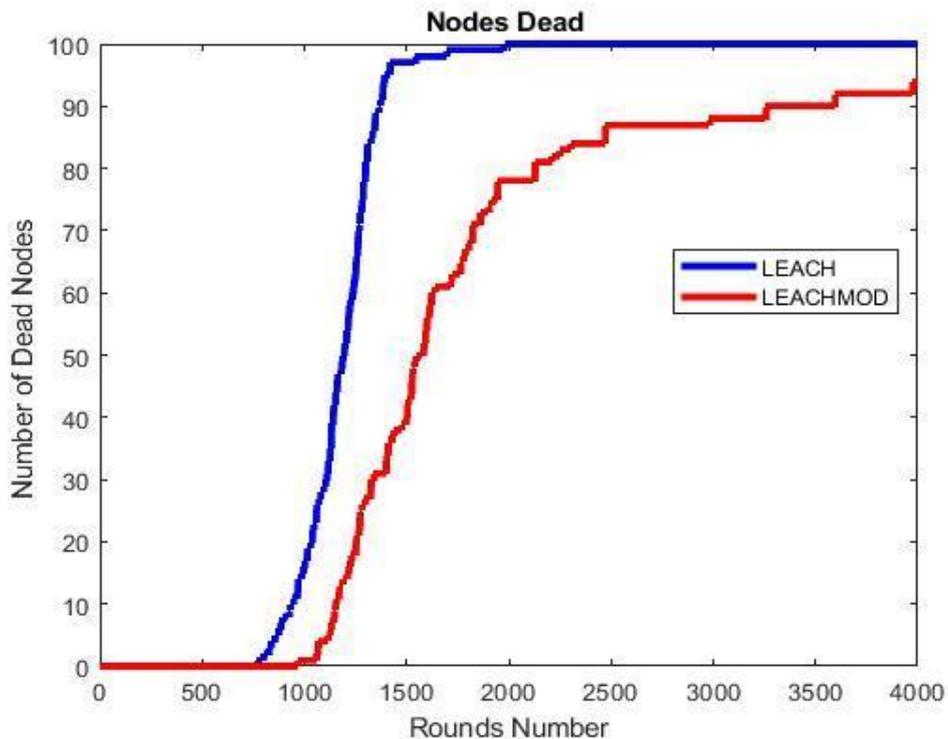
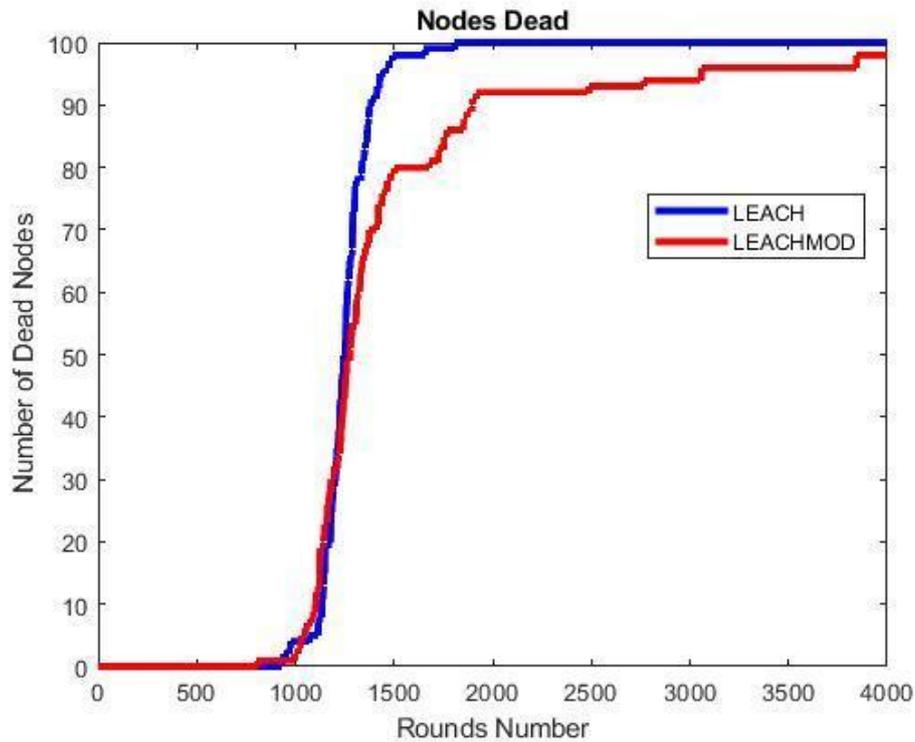


Figure 3. 13 : Comparaison des nœuds morts sur 4000 rounds avec  $P=0.07$

b)  $P=0.2$ Figure 3. 14 : Comparaison des nœuds morts sur 4000 rounds avec  $P=0.2$ 

En modifiant la valeur de la probabilité  $P$  de sélection des chefs de cluster (CH) de 0.05 à 0.07, on observe que ce changement a impacté les protocoles LEACH et LEACH-MOD. Lorsque la valeur de  $P$  est augmentée de 0.07 à 0.2, le protocole LEACH maintient quant à lui des valeurs presque identiques, tandis que le protocole LEACH-MOD connaît une dégradation, passant de 1106 à 806.

Ces résultats mettent en évidence l'influence remarquable de la valeur de la probabilité  $P$  de sélection des chefs de cluster sur le protocole LEACH-MOD par rapport au protocole LEACH.

**LEACH : de 827 à 771 pour  $P=0.07$  à 934 tours pour  $P=0.2$**

**LEACH-MOD : de 1107 à 967 pour  $P=0.07$  à 808 tours pour  $P=0.2$**

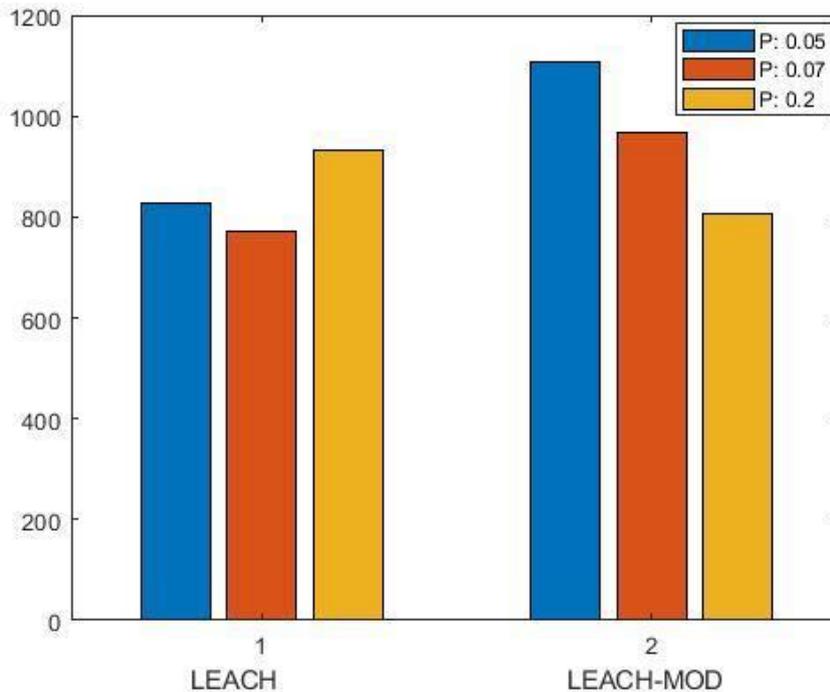


Figure 3. 15 : Comparaison de premier nœud mort selon la valeur de P

#### Résumé de la troisième comparaison étudiée

La probabilité de sélection des chefs de clusters (CH) a une influence importante sur les performances des protocoles LEACH et LEACH-MOD. Voici comment la modification des probabilités de sélection des chefs de cluster peuvent affecter les résultats obtenus :

**Durée de vie du réseau :** la probabilité de sélection des chefs de cluster détermine la fréquence à laquelle les nœuds sont choisis pour devenir des chefs de cluster. Une valeur plus élevée de cette probabilité signifie qu'un plus grand nombre de nœuds seront sélectionnés comme chefs de clusters. Cela peut entraîner une rotation plus fréquente des chefs de clusters et une répartition plus équilibrée des charges de travail. En conséquence, la durée de vie du réseau peut être prolongée car les nœuds épuisent leur énergie de manière plus uniforme.

**Équilibre de l'énergie :** une probabilité de sélection des chefs de cluster plus élevée peut contribuer à équilibrer l'utilisation de l'énergie entre les nœuds. Lorsque les chefs de cluster sont sélectionnés plus fréquemment, chaque nœud a une probabilité plus élevée d'être choisi en tant que chef de cluster, ce qui permet une meilleure répartition des responsabilités de communication. Les nœuds ont alors des chances égales de dépenser leur énergie pour les transmissions de données et devenir chef de cluster, ce qui réduit les disparités d'énergie entre les nœuds.

**Overhead de communication** : une probabilité de sélection des chefs de cluster plus élevé peut augmenter l'overhead de communication dans le réseau. Plus le nombre de chefs de clusters est élevé, plus les messages de contrôle nécessaires pour la formation et la maintenance des clusters seront nombreux. Cela peut entraîner une consommation d'énergie accrue due à la transmission de ces messages supplémentaires. Par conséquent, il est important de trouver un équilibre entre la probabilité de sélection des chefs de cluster et l'overhead de communication afin de maximiser l'efficacité énergétique globale du réseau.

Le tableau présenté ci-dessous synthétise les résultats des comparaisons précédentes, ainsi que d'autres comparaisons effectuées en modifiant les valeurs de divers paramètres du réseau :

Tableau 3. 3 : Synthétise sur les résultats des comparaisons précédentes et d'autres comparaisons

	<b>LEACH</b>	<b>LEACH-MOD</b>
	P=0.05 ; BS= (50,50)	r= 4000 ; n=100 ; Xm=100
Le premier noeud mort (round)	827	1107
Le nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	00	18
La fin de transmission des paquets à la station de base (round)	1037	4000
	P=0.05 ; BS= (150,50)	r= 4000 ; n=100 ; Xm=100
Le premier noeud mort (round)	792	992
Le nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	0	20
La fin de transmission des paquets à la station de base (round)	2003	3999
	P=0.05 ; BS= (50,50)	r= 4000 ; n= 100 ; Xm=200
Le premier noeud mort (round)	492	573
Le nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	01	33
La fin de transmission des paquets à la station de base (round)	1205	3999
	P=0.07 ; BS= (50,50)	r= 4000 ; n= 100 ; Xm=100
Le premier noeud mort (round)	771	967
Le nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	00	09
La fin de transmission des paquets à la station de base (round)	1445	3837
	P=0.07 ; BS= (150,50)	r= 4000 ; n=100 ; Xm=100
Premier noeud mort (round)	546	541
Nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	00	05
Fin de transmission des paquets à la station de base (round)	1442	3981
	P=0.2 ; BS= (50,50)	r= 4000 ; n=100 ; Xm=100
Le premier noeud mort (round)	934	808
Le nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	00	04
La fin de transmission des paquets à la station de base (round)	1780	2620
	P=0.2 ; BS= (150,50)	r= 4000 ; n=100 ; Xm=100
Le premier noeud mort (round)	303	422
Le nombre des noeuds vivants à la fin de simulation	00	04
La fin de transmission des paquets à la station de base (round)	1245	1371

Ces comparaisons ont été réalisées en manipulant les paramètres du réseau afin d'analyser leur impact sur les performances des protocoles étudiés. Les résultats obtenus mettent en évidence les variations observées dans les mesures et les indicateurs de performance, en fonction des différentes configurations testées. Cette analyse approfondie des résultats permet de mieux comprendre les interactions entre les paramètres du réseau et les performances des protocoles, ce qui contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil.

### 5. Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude comparative entre deux protocoles : LEACH et LEACH-MOD, en utilisant le simulateur MATLAB. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la durée de vie du réseau, le nombre de nœuds actifs et la consommation d'énergie en modifiant les valeurs des paramètres influençant les résultats, tels que la position de la station de base (BS), la probabilité de sélection des chefs de cluster (CH) et la surface de la zone surveillée.

Le protocole LEACH-MOD s'est distingué en maintenant une consommation d'énergie globale plus faible tout au long des rounds. Cette efficacité est obtenue grâce à l'utilisation de deux critères de sélection des CH : l'énergie résiduelle et la distance par rapport à la BS. Ainsi, LEACH-MOD a réussi à prolonger la durée de vie du réseau en conservant une quantité significative d'énergie jusqu'à la fin de la simulation. En revanche, le protocole LEACH a consommé l'intégralité de leur énergie plus rapidement, tandis que LEACH-MOD n'a utilisé que 30% de son énergie totale.

Enfin, cette étude comparative a permis de mettre en évidence les performances et les différences entre les protocoles LEACH et LEACH-MOD. Les résultats obtenus offrent une meilleure compréhension des interactions entre les paramètres du réseau et les performances des protocoles, fournissant ainsi des informations précieuses pour le développement et l'amélioration des réseaux de capteurs sans fil.

# **Conclusion Générale**

---

## Conclusion Générale

La maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) constitue un domaine de recherche crucial dans le domaine des technologies de l'information et de la communication. Ces réseaux jouent un rôle essentiel dans la surveillance et la collecte de données dans des environnements difficiles d'accès ou dangereux pour les humains, tels que les zones de catastrophes naturelles ou les environnements industriels. Cependant, leur utilisation est restreinte par la quantité limitée d'énergie disponible pour alimenter les capteurs. Ainsi, l'optimisation de la consommation d'énergie représente un défi majeur dans le développement de ces réseaux.

Le but de ce domaine de recherche est de maximiser la durée de vie des RCSF en développant des techniques d'optimisation de la consommation d'énergie, permettant ainsi aux capteurs de fonctionner pendant des périodes prolongées malgré des ressources énergétiques limitées. Cette recherche implique des aspects multidisciplinaires tels que la gestion de l'énergie, la planification de la communication et la conception de protocoles de communication.

Dans cette conclusion, nous avons examiné les avancées récentes dans ce domaine et les défis associés à la maximisation de la durée de vie des RCSF en utilisant des techniques d'optimisation de la consommation d'énergie, ainsi que les protocoles correspondants pour notre étude.

Nous avons présenté le protocole LEACH comme base de tous les protocoles de routage hiérarchiques proposés dans la littérature. LEACH vise à minimiser la consommation globale d'énergie en répartissant la charge entre tous les nœuds grâce à l'utilisation du clustering. Cette approche présente plusieurs avantages, notamment la réduction de la congestion du trafic, la diminution de la consommation d'énergie et de temps, ainsi que la réalisation d'une transmission rapide des informations.

Cependant, malgré son efficacité pour les RCSF de petite envergure, le protocole LEACH présente certaines limitations lorsqu'il est appliqué à des réseaux de grande taille. Parmi ces limitations, on peut citer la dégradation rapide des nœuds, car le choix des chefs de cluster (CH) ne tient pas compte de l'énergie résiduelle de chaque nœud ni de la distance les séparant de la station de base (BS).

Afin d'améliorer la durée de vie des réseaux, nous avons présenté une variante du protocole LEACH, appelée LEACH-MOD. Cette variante du protocole prend en compte à la fois l'énergie résiduelle et les paramètres de distance par rapport à la station de base (BS) dans le but d'améliorer la durée de vie du réseau.

---

Lors de la simulation comparative de ces protocoles, nous avons observé une amélioration significative de la durée de vie avec le protocole LEACH-MOD. Dans la plupart des scénarios simulés, le protocole LEACH-MOD a démontré une amélioration importante en termes de consommation d'énergie et de nombre de nœuds vivants. Il utilise à la fois l'énergie résiduelle et la distance par rapport à la station de base (BS) comme critères de sélection des CH, ce qui permet de maintenir en moyenne 14 % de nœuds vivants par rapport à LEACH, qui maintiennent respectivement 4 % et 0 % de nœuds vivants. En ce qui concerne la consommation d'énergie, le protocole LEACH-MOD a réussi à maintenir en moyenne 30 % de la totalité de l'énergie jusqu'au dernier round, tandis que LEACH a consommé la totalité de leur énergie.

Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de cette variante LEACH-MOD pour améliorer la durée de vie, la consommation d'énergie et le maintien des nœuds actifs dans les réseaux de capteurs sans fil. L'utilisation de ces protocoles permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie disponible, prolongeant ainsi la durée de vie des réseaux et garantissant un fonctionnement continu des capteurs.

Il convient de noter que la recherche dans ce domaine est en constante évolution, avec de nouvelles techniques et protocoles émergents visant à améliorer davantage les performances des réseaux capteurs sans fil. Des efforts continus sont nécessaires pour explorer de nouvelles approches et technologies, tout en prenant en compte les contraintes de ressources et les exigences spécifiques de chaque application.

Enfin, l'optimisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil est un enjeu crucial dans le domaine des technologies de l'information et de la communication. Les variantes du protocole LEACH, telles que LEACH-MOD, ont démontré leur efficacité pour maximiser la durée de vie des réseaux en optimisant la consommation d'énergie. Cependant, il reste encore des opportunités de recherche pour développer de nouvelles techniques et protocoles afin d'améliorer davantage les performances des réseaux de capteurs sans fil et de répondre aux besoins spécifiques des différentes applications.

## Références bibliographiques

- [1] B. Bengherbia, "Nœud de réseau de capteurs sans fil (wsn) dans une architecture embarquée de type FPGA", thèse de doctorat en électronique, faculté de Technologie, Université de Blida-1, Blida, Algérie, 2018
- [2] A. DJOUATI et H. MECHAOUR, "Conception et réalisation d'une centrale domotique", mémoire de master En Informatique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2014/2015.
- [3] B. SAOUD, "Amélioration de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil basée sur l'algorithme d'optimisation des baleines. Réseaux sans fil ad hoc et capteurs ", 2022, vol. 54.
- [4] S. BINDEL, "Algorithmique et applications pour les flottes hétérogènes multiniveaux de matériels mobiles communicants autonomes", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France, 2016.
- [5] Y. FAIZE, "Conception de capteurs autonomes et intelligents sans fil pour un campus durable, responsable et fortement connecté", Thèse de doctorat, Bordeaux, France, 2022.
- [6] D. NGOM, "Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité", thèse de doctorat, l'Université de Haute Alsace (France) et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), France, 2016.
- [7] A. AICHE, "La notification et l'agrégation des rapports d'échecs à l'aide du routage directionnel et de l'apprentissage automatique dans WSN", mémoire de Master, Faculté des Mathématiques et de l'Informatique, université de Mohamed Boudiaf, M'Sila, Algérie, 2021-2022.
- [8] F. Taibi et KH. Meziani, "Optimisation de la consommation d'énergie au niveau des réseaux de capteurs sans fil (WSN)", mémoire de Master, faculté des Sciences Exactes Et Sciences de la Nature et de la Vie, Université L'arbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Algérie, 2014-2015.
- [9] M. Bouallegue, "Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Réseaux et télécommunications, thèse de doctorat, Université du Maine, France, 2016.
- [10] A. Benzerbadj, "Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance", thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, Brest, France, 2018.
- [11] POTTIE, G. J. et KAISER, W. J , "Wireless integrated network sensors". ACM Communications, 43, 51-58, 2000.

- 
- [12] A. Belfkih, B. Sadeg, C. Duvallet, L. Amanton, "Les bases de données dans les réseaux de capteurs sans fil", *Techniques et Sciences Informatiques*, V.33 (N°9-10), pp.739-776. 2014.
- [13] M. Messai, *Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil*, Mémoire de Magistère en Informatique, Département d'Informatique, École Doctorale d'Informatique, Faculté des Sciences Exactes, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 2007-2008.
- [14] C. Castelluccia et F. Aurélien, "Protéger les réseaux de capteurs sans fil", *Actes du symposium SSTIC 08*, pp.3-11.2008- actes.sstic.org.
- [15] Guéréguin Der Sylvestre Sidibe, "Architecture matérielle et protocolaire pour réseaux de capteurs sans fil adaptés à la surveillance environnementale", Thèse de doctorat en Informatique, en partenariat avec Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (laboratoire), dans le cadre de École doctorale des sciences pour l'ingénieur (Clermont-Ferrand), Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France, 30-08-2021.
- [16] K. Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati « *Wireless Sensor Networks : Technology, Protocols, and Application* » ISBN 978-0-471-74300-2 , pp 20-22
- [17] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, E. Cayirci : *Wireless sensor NETWORKS : a survey*, Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA, 20 December 2001.
- [18] Y. Sara Subramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40 :102–114, Aug. 2002.
- [19] M. Hadjila & M. Feham, « A comparative study of the wireless sensor networks routing protocols scalability », *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS)* Vol.2, No.4, July 2011,
- [20] Bhardwaj and A.P Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. in *Proceedings of the 21st IEEE INFOCOM*, 13(4), January 2011.).
- [21] F. MANSOUR, F. FENICHE, *Etude Comparative Entre Deux Protocoles De Routage dans Les Réseaux De Capteur Sans Fil 'AODV et DSR'*, mémoire de master domaine informatique, Département de l'informatique, Faculté de Mathématiques et informatique, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B, A, Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2021.
- [22] M. Bouallegue. "Protocole de communication et optimisation de l'énergie dans les RCSF", Thèse de doctorat, Université de Bretagne Loire, 31 Mars 2016.
- [23] Y. Romdhane, " Evaluation des performances des protocoles S-MAC et Directed Diffusion dans les réseaux de capteurs ", *Projet de fin d'études*, Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com), 2006 / 2007.
-

- 
- [24] F.Viola, "Routage dans les réseaux capteurs sans fil" Journées ResCom Strasbourg, Université de Franch.comté, 9-10. Octobre 2008.
- [25] M. Ullah, A. Waqar, 'Evaluation of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks', Master thesis, Blekinge Institute of Technology SWEDEN, 2009.
- [26] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. *Wireless communications, IEEE*, 11(6) :6–28, 2004.
- [27] B. Deepak et S. Sharwari, LEACH : An Energy Efficient Routing Protocol using Omnet++ for Wireless Sensor Network,Conference Paper, March 2017, n0 ,pp 1-4.doi 10.1109/ICICCT.2017.7975241, 2017.
- [28] A. Braman and G. Umapathi, " A comparative study on advances in leach routing protocol for wireless sensor networks : A survey", *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(2) : pages 5683–5690, 2014.
- [29] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. Teen, "a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", In *Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pages 30189a–30189a, 2001.
- [30] J.N Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey", *Magazine : IEEE Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, December 2004.
- [31] D. Bhattacharyya, T. Kim, and S. Pal, "A comparative study of wireless sensor networks and their routing protocols", *Sensors* 2010, 10, pages : 10506-10523 ; doi :10.3390/s101210506, 24 Novembre 2010.
- [32] Y. Song, "Réseaux de Capteurs Sans Fil : Comment Fournir La Qualité de Service Tout En Économisant l'Énergie ", 2013.
- [33] A. Belfkih, B. Sadeg, C. Duvallet, L. Amanton,"Les bases de données dans les réseaux de capteurs sans fil",*Techniques et Sciences Informatiques*, V.33 (N°9-10), pp.739-776. 2014.
- [34] D. Birajdar et SH., "Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Network", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
- [35] M. Balakrishnan. W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, 2, 2000.
- [36] L. Han. Leach-hpr : An energy efficient routing algorithm for heterogeneous wsn. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS)*, 2, 2011.

- 
- [37] Saoud, B., Boucif, M., & Daas, M. (2022). Amélioration de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil basée sur les protocoles de routage. Réseaux informatiques, Big Data et IdO : Actes de l'ICCBI 2021 , 117 , 339.
- [38] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS : Power-efficient gathering in sensor information systems", in IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, Vol. 3.
- [39] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. Teen : à routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, pages 30189a–30189a, 2001.
- [40] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. Aptien : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In 16th International Parallel and Distributed Processing Symposium, page 0195b, 2002.
- [41] S. Lindsayet, C. S. Raghavendra CS, and K. M. Sivalingam, "Data Gathering in Sensor Networks using the Energy Delay Metric", in IEEE Computer Society, 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium, USA, April 2001, pp. 188.
- [42] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan,"Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks", in proceedings of the Hawaii International Conference on SystemScience, vol. 8, January 2000, pp. 1-10.
- [43] M. DOMMI, H.HADJI. PROTOCOLES DE ROUTAGE ECONOMES EN ENERGIE, page 40. 2014.
- [44] Perillo, Mark A. and Wendi B. Heinzelman. "Wireless Sensor Network Protocols." Handbook of Algorithms for Wireless Networking and Mobile Computing, (2005).
- [45] <https://fr.mathworks.com/discovery/simulation-software.html> , consulté le 26-01-2023

## ملخص

أصبحت شبكات الاستشعار اللاسلكية (RCSF) تقنية حيوية لمجموعة متنوعة من التطبيقات، بما في ذلك المراقبة البيئية والمراقبة والأتمتة الصناعية. يتمثل أحد التحديات الحاسمة في RCSF في موارد الطاقة المحدودة لعقد أجهزة الاستشعار الفردية، والتي لها تأثير كبير على الحياة التشغيلية للشبكة. يعد تمديد عمر خدمة الشبكة أمرًا بالغ الأهمية لضمان جمع البيانات لفترة طويلة وبدون انقطاع. في هذه الدراسة، اقترحنا بروتوكول توجيه جديد يعتمد على بروتوكول LEACH. كان المخطط الجديد المقترح يسمى LEACH-MOD. تم تنفيذه واختباره. تُظهر نتائج المحاكاة مدى فعالية اقتراحنا الجديد مقارنة بروتوكول LEACH من حيث عمر الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** RCSF، التوجيه، التجميع، LEACH، العمر، المستشعر.

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont devenus une technologie vitale pour diverses applications, notamment la surveillance de l'environnement, la surveillance et l'automatisation industrielle. Un défi critique dans les RCSF est les ressources énergétiques limitées des nœuds de capteurs individuels, qui ont un impact significatif sur la durée de vie opérationnelle du réseau. L'allongement de la durée de vie du réseau est crucial pour assurer une collecte de données prolongée et ininterrompue. Dans cette étude, nous avons proposé un nouveau protocole de routage basé sur le protocole LEACH. Le nouveau schéma proposé a été appelé LEACHMOD. Il a été implémenté et testé. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de notre nouvelle proposition par rapport au protocole LEACH en termes de durée de vie du réseau.

**Mots clés :** RCSF, Routage, Clustering, LEACH, Durée de vie, Capteur.

## Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) have emerged as a vital technology for various applications, including environmental monitoring, surveillance, and industrial automation. One critical challenge in WSNs is the limited energy resources of individual sensor nodes, which significantly impact the network's operational lifetime. Extending the network's lifetime is crucial to ensure prolonged and uninterrupted data collection. In this study, we have proposed a new routing protocol based on LEACH protocol. The new proposed scheme has been called LEACHMOD. It has been implemented and tested. Results of simulation show the effectiveness of our new proposition in comparison with LEACH protocol in term of network lifetime.

**Keywords:** WSN, Routing, Clustering, LEACH, Lifetime, Sensor.