



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université AMO de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département d'Informatique

# Mémoire de Master

## en Informatique

*Spécialité : Génie Système Informatique*

## Thème

---

Routage avec optimisation de la consommation  
d'énergie dans les réseaux de capteurs hétérogènes  
sans fil .

---

Encadré par

— DR.AKLI ABBAS

Réalisé par

— AIFAOUI SARA

— FEKAR ROUMAÏSSA

2020/2021

# *Remerciements*

Avant tout, nous remercions Dieu, le tout puissant qui nous a donné le courage et la persévérance afin de pouvoir mener ce travail à terme.

Nous remercions notre promoteur : Monsieur Akli ABBAS, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de nous encadrer durant ce projet, mais aussi pour nous avoir soutenues tout au long de ce dernier.

Nous remercions les membres du jury qui ont consenti à examiner notre travail et ce de manière objective.

Nous tenons à saluer la peine et l'effort fournis par l'ensemble de nos professeurs afin d'assurer notre formation tout au long de notre cursus universitaire et leur disons de ce fait, merci.

C'est donc avec une immense fierté, que nous adressons nos remerciements les plus distinguées à toute personne qui a contribué à l'achèvement de ce projet, directement ou indirectement, l'expression de nos sincères grâces.

# *Dédicaces*

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail, à la mémoire de mes chère parents qui ont veillés à la réalisation de ma formation d'études, à mes frères (Alla et Amar), sans oublié mes cousins Nada, Widad, Soumia.

Mes chères amis et à ceux qui m'aimaient :Roumaissa, Khadidja, ouassila, Radja, Amel, Sakina, Asma, Hada, Siham ,Nor\_el\_hoda, Issam, Meziane, Amira.

Et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

*Aifaoui Sara .*

# *Dédicaces*

Le dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers, je cite :

les parents les plus chers au monde, Papa et Maman, que dieu les garde et les protège.

Mon frère Alla et Amine, mes sœur Khadija et Bassma sans oublié mes grand-mère et mes grand-père.

A mon binôme Sara et mes amis Ouassila, Radja, Amel, Manel, Amel....

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

*Fekar Roumaïssa.*

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>vii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>2</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Présentation des réseaux de capteurs . . . . .	5
1.2.1 Définition d'un capteur sans fil . . . . .	5
1.2.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	6
1.3 Architecture des réseaux de capteurs . . . . .	6
1.3.1 Architecture d'un capteur sans énergie renouvelable . . . . .	6
1.3.2 Architecture d'un capteur avec énergie renouvelable . . . . .	9
1.3.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	11
1.4 Classification des réseaux de capteurs . . . . .	12
1.4.1 Approches basées sur le cycle d'activité . . . . .	12
1.4.2 Approches dirigées par les données . . . . .	12
1.4.3 Approches basées sur la mobilité . . . . .	12
1.5 Caractéristique des réseaux de capteurs . . . . .	13
1.6 Domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	14

1.6.1	Les Applications Militaires . . . . .	14
1.6.2	Les applications Médicales . . . . .	14
1.6.3	Les applications Environnements . . . . .	14
1.6.4	Les application d’agriculture de précision . . . . .	15
1.7	Pile protocolaire . . . . .	15
1.8	Consommation d’énergie dans les RCSF . . . . .	17
1.8.1	Les principes opérations dues à la consommation d’énergie . . . . .	17
1.8.2	Modèle de consommation d’énergie . . . . .	18
1.8.3	Modèle de source énergie . . . . .	19
1.9	Modèle hétérogène pour les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	20
1.9.1	Type d’hétérogénéité des ressources . . . . .	20
1.9.2	Impact de l’hétérogénéité sur les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	21
1.9.3	Mesures de performance . . . . .	21
1.10	Conclusion . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Routage dans les réseaux de capteur sans fil</b>	<b>23</b>
2.1	Introduction . . . . .	23
2.2	Définition de routage . . . . .	23
2.3	Le routage dans les RCSFs . . . . .	24
2.3.1	Définition . . . . .	24
2.4	Classification protocoles de routage dans les RCSFs . . . . .	24
2.4.1	Classification selon la structure réseau . . . . .	25
2.4.2	Classification selon l’initiateur de communication . . . . .	27
2.4.3	Classification selon l’établissement de la route . . . . .	28
2.4.4	Classification selon les fonctionnalités du protocole . . . . .	29
2.5	Les facteur de conception de protocoles de routage . . . . .	29
2.6	Le routage dans les RCSF sans énergie renouvelable . . . . .	31
2.6.1	Quelques protocoles de routage hiérarchiques utilisés dans les RCSF . . . . .	31
2.7	Le routage dans les RCSF avec énergie renouvelable . . . . .	37
2.7.1	Quelques algorithmes de routage dans ISEH . . . . .	37
2.8	Conclusion . . . . .	39

<b>3</b>	<b>Le protocole EH-LCHREP-HS(EnergyHarvesting Layer and Cluster based Hierarchical Routing and Energ Optimization Protocol and Heterogeneous Sensor)</b>	<b>40</b>
3.1	Introduction . . . . .	40
3.2	Description de protocole . . . . .	41
3.2.1	Motivation . . . . .	41
3.2.2	Hypothèse . . . . .	42
3.2.3	principe de fonctionnement . . . . .	42
3.3	Conclusion . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Évaluation de performance</b>	<b>56</b>
4.1	Introduction . . . . .	56
4.2	Environnement de simulation . . . . .	56
4.2.1	Python : . . . . .	57
4.2.2	Paramètres de simulation . . . . .	57
4.2.3	Description du système . . . . .	58
4.2.4	Variables suggestives du système . . . . .	59
4.3	Évaluation des performances . . . . .	60
4.3.1	Distribution des nœuds et la sélection des Clusters Head et les Faux Clusters Head . . . . .	60
4.3.2	Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets . . . . .	61
4.3.3	Nombre de nœuds mort en termes de paquets envoyés . . . . .	63
4.4	Conclusion . . . . .	64
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>66</b>

# Table des figures

1.1	Architecture d'un capteur sans énergie renouvelable [1] . . . . .	7
1.2	Architecture d'un capteur avec énergie renouvelable.[2] . . . . .	9
1.3	Architecture d'un ISEH system.[7] . . . . .	10
1.4	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [13] . . . . .	11
1.5	Domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil [15] . . . . .	15
1.6	Pile protocolaire [3] . . . . .	16
1.7	Modèle de consommation d'énergie. [16] . . . . .	18
1.8	La courbe de la puissance $P_s(t)$ . . . . .	19
2.1	Classification des protocoles de routage. [24] . . . . .	25
2.2	Routage plat.[21] . . . . .	26
2.3	Routage hiérarchique.[21] . . . . .	26
2.4	Routage basé sur la localisation.[21] . . . . .	27
4.1	Distribution des nœuds et la sélection des CHs et les FCHs. . . . .	60
4.2	Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets (EH-LCHREP-HS). . . . .	61
4.3	Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets (CRSH). . . . .	62
4.4	Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets (EH-LCHREP-HS) sans énergie renouvelable. . . . .	62
4.5	Nombre de nœuds mort en termes de paquets envoyés (EH-LCHREP-HS). . . . .	63
4.6	Nombre de nœuds mort en termes de paquets envoyés (CRSH) . . . . .	64



# Liste des tableaux

4.1	Paramètres de simulation. . . . .	58
4.2	Variables suggestives du système . . . . .	59



## Liste des abréviations

WSN	Wireless Sensor Network .
RCSF	Réseau de capture sans fil .
ISEH	Intelligent Solar Energy Harvesting .
EHWSN	Energy Harvisting Wireless Sensor Network .
DCs	Analog- Digital Converter .
GPS	Global Positioning System .
OS	Operating System .
EEWSN	Energy Efficient Wireless Sensor Network .
TinyOS	Tiny Operating System .
IP	Internet Protocol .
MPPT	Maximum Power Point Tracking .
TDMA	Time Division Multiple Access.
CDMA	Code Division Multiple Access.
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy .
CM	Cluser Momber .
CH	Cluster Head .
FCH	Faux Cluster Head .
QoS	Qualité de service .
EH-LCHREP-HS	Energy Harvesting Layer and Cluster based Hierarchical Routing and Energy Optimization Protocol Heterogeneous Sensor .
MCR	Multi-hop communication routing .
CRSH	cluster-based routing scheme for heterogeneous network .
HASS	Harvisting Aware Speed Selection .
AFEFP	Adapptive Framework Energy Prediction .

QoS	Quality of Service .
HWSN	hierarchical wireless sensor network .
EEHC	Egyptian Electricity Holding Company .
RSSI	Responsable sécurité des systèmes d'information .

# Introduction générale

- **Motivations**

Ces dernières années, nous avons vu l'émergence de réseaux sans fil multi-sauts. Avec des capacités différentes, des caractéristiques différentes et des applications cibles différentes, nous pouvons Identifier le réseau de capteurs (RCSF) et le réseau de capteurs et d'actionneurs (WSAN) le plus proche. Il s'agit de réseaux auto-organisés, qui sont constitués d'un grand nombre de nœuds capteurs autonomes à faibles ressources (puissance de calcul, mémoire, puissance de transmission, etc.) et d'un petit nombre de nœuds. Les actionneurs ont généralement riche en ressources énergétiques.

L'objectif principal est de développer des technologies d'économie d'énergie pour les réseaux de capteurs hétérogène sans fil. Ces technologies se concentrent sur la topologie du réseau et le routage des données vers le centre de données. Parce que RCSF n'a pas de méthode directe de réception de l'énergie de travail, Les chercheurs ont étudié diverses méthodes de récupération d'énergie qu'ils ont développées capteurs capables de récupérer l'énergie environnementale de l'environnement, tels que énergie solaire et thermique. . .et beaucoup plus. Cette méthode peut prolonger la durée de vie de la batterie ou l'éliminer complètement.

- **Objectif de notre étude**

Notre principal objectif dans ce mémoire est de proposer un nouveau protocole de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs hétérogènes sans file qui minimise la consommation d'énergie.

- **Contribution**

Dans ce mémoire nous avons proposé un protocole de routage hiérarchique dans le cas des réseaux de capteurs hétérogènes sans fil prenant en compte l'énergie renouvelable et non renouvelable . Ce protocole est appelé EH-LCHREP-HS (EnergyHarvesting Layer and Cluster based Hierarchical Routing and Energ Optimization Protocol and Heterogeneous Sensor) qui est l'amélioration de protocole de routage LCHREP [38]. Les résultats obtenus montre que EH-LCHREP-HS permet de prolonger la durée de vie du réseau.

- **Organisation du mémoire**

Nous intéressons dans ce mémoire à la description de différentes étapes de la réalisation de notre projet. Il est subdivisé en quatre principaux chapitres :

**Chapitre 1 :** « Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil »

Dans le première nous avons expliqué la signification des réseaux de capteurs sans fil basés sur les énergies renouvelables et non renouvelables et leur architecture, leurs différentes classifications et caractéristiques et les domaines d'application . Après cela, nous avons défini les différentes opérations dues à la consommation d'énergie des nœuds, aux modèles de source d'énergie et le modèle hétérogène pour RCSF.

**Chapitre 2 :** « Routage dans les réseaux de capteur sans fil »

Dans le deuxième chapitre, nous étudions les différentes technologies développées pour économiser l'énergie, commençons par définir le routage puis expliquons les différentes méthodes de routage, puis détaillons quelques protocoles de routage. Sans énergie renouvelable, et protocoles avec énergie renouvelable, nous étudierons alors le nouveaux protocole de routage hétérogène dans RCSF.

**Chapitre 3 :** «Le protocole EH-LCHREP-HS(EnergyHarvesting Layer and Cluster based Hierarchical Routing and Energ Optimization Protocol and Heterogeneous Sensor) » Nous proposons dans ce chapitre notre protocole de routage hiérarchique et qui est l'amélioration des deux protocoles de routage (LCHREP) et CRSH, c'est un protocole de routage hiérarchique basée sur la récupération d'énergie ambiante.

**Chapitre 4 : « Évaluation de performance »**

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats d'évaluation de notre protocole effectué avec Python.

Et nous terminons par une conclusion générale et quelques perspectives.

# Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

## 1.1 Introduction

Depuis leur création, les réseaux sans fil ne cessent de connaître un succès croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à leurs divers avantages, cette technologie a pu s’instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux de communication actuels. En effet, grâce à leur support de transmission qui est le média hertzien, ces réseaux présentent plusieurs avantages qui sont entre autres le coût réduit des équipements, la facilité d’installation et l’ubiquité de l’information. Au cours de leurs évolutions, les réseaux sans fil ont donné naissance à diverses architectures telles que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil, les réseaux Ad hoc, etc.

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation générale de la technologie RCSF.

## 1.2 Présentation des réseaux de capteurs

### 1.2.1 Définition d’un capteur sans fil

Il existe deux types de capteurs sans fil, le capteur d’énergie renouvelable et le capteur sans énergie renouvelable.



- **le capteur sans énergie renouvelable** Un capteur est un petit appareil électronique ,peu couteux,doté de ressources limitées en énergie (batterie),en puissance de calcul et en capacité de stockage. Un capteur possède la capacité de mesurer une valeur physique dans l'environnement qui l'entoure telle que la température, la lumière,des vibrations, pression,etc.et de transmettre en utilisant les communication sans fil à un centre de contrôle appelé une station de base.[1]
- **le capteur avec énergie renouvelable**  
Les RCSF basés sur la récolte d'énergie (EHWSN) sont le résultat de la dotation nœuds RCSF avec la capacité d'extraire de l'énergie de l'environnement. La récupération d'énergie peut exploiter différentes sources d'énergie, telles que comme l'énergie solaire, le vent, les vibrations mécaniques, les variations de température, magnétiques champs, etc. Fournir continuellement de l'énergie et la stocker pour une utilisation future, de l'énergie les sous-systèmes de récolte permettent aux nœuds RCSF de durer éternellement.[2]

## 1.2.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un ensemble de nœuds, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers, communiquant sans fil et capable de récolter et transmettre des données environnementales et de réagir en cas de besoin. [3]

C'est une coexistence de nœuds à faibles ressources (capteurs) et de nœuds riches en ressources (actionneurs) présente de nouveaux défis liés à l'hétérogénéité.

## 1.3 Architecture des réseaux de capteurs

### 1.3.1 Architecture d'un capteur sans énergie renouvelable

L'architecture du capteur se compose de deux parties : le matériel et le système d'exploitation

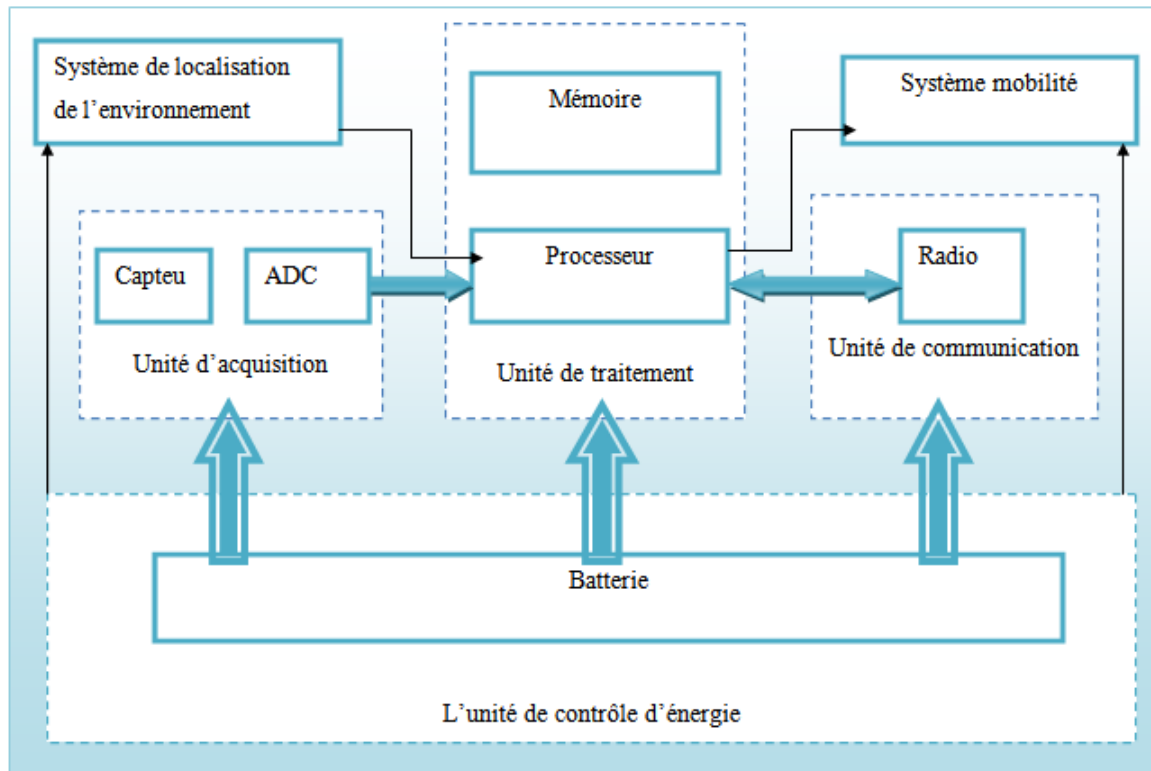


FIGURE 1.1 – Architecture d'un capteur sans énergie renouvelable [1]

- **Matériel** Un capteur se compose principalement de quatre unités de base :

- **Unité d'acquisition**

L'unité d'acquisition est généralement composée de deux sous-unités : capteur et le convertisseur Analogique/Numérique ADCs (Analog-Digital Converter). Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, puis envoyé à l'ADC. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.

- **Unité de traitement**

Elle est composée de deux interfaces qui sont une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle la collaboration d'un nœud avec les autres nœuds afin de collecter et de stocker les données. [1]

- **Unité de Communication**

Elle est composée d'un émetteur et d'un récepteur, avec un support de communication radio les différents nœuds de réseaux permettent de communiquer entre eux.

- **Unité de contrôle d'énergie** Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique pour alimenter tous ses composants qui se présente généralement sous forme d'une batterie.[4] Elle alimente les unités que nous avons citées et elle n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position Système).[5]

- **Système d'exploitation**

le système d'exploitation (SE), en anglais Operating System (OS) pour capteurs en réseau sont spécifiquement conçus pour optimiser l'usage des ressources matérielles limitées dont ils disposent : une mémoire avec une petite capacité, un processeur de faible vitesse de traitement et une ressource énergétique très limitée. De nombreux systèmes d'exploitation spécialisés existent, parmi lesquels [6] :TinyOS, ContikiOS, MantisOS, Nano-RK, LiteOS.

### 1.3.2 Architecture d'un capteur avec énergie renouvelable

L'architecture système d'un nœud de capteur sans fil comprend les composants suivants [2] :

1. Le (s) récupérateur (s) d'énergie (Energie Harvester) : en charge de la conversion énergie externe ambiante ou produite par l'homme à l'électricité.
2. un module de gestion de l'alimentation(Power Managment) : qui collecte l'énergie électrique de la moissonneuse et la stocke ou la fournit aux autres composants du système pour une utilisation immédiate.
3. stockage d'énergie (Energie Storage) : pour conserver l'énergie récoltée pour une utilisation future.
4. un microcontrôleur (low power microcontroller unit).
5. un émetteur-récepteur radio ( radio transceiver) : pour transmettre et recevoir des informations.
6. équipement sensoriel (Sensor).
7. un convertisseur A / N(A/D converter) : pour numériser le signal analogique généré par les capteurs et le mettre à la disposition du microcontrôleur pour un traitement ultérieur.
8. mémoire (Memory) : pour stocker les informations détectées : données et code liés à l'application. Dans la section suivante,nous concentrons sur les composants de récupération d'énergie (le énergie) d'un nœud EHWSN.

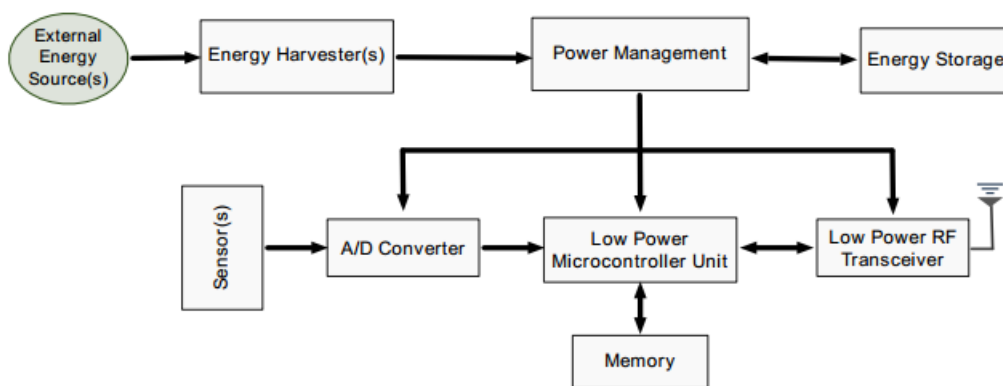


FIGURE 1.2 – Architecture d'un capteur avec énergie renouvelable.[2]

**ISEH system ( Intelligent Solar Energy Harvesting )** : un système intelligent de récupération de l'énergie solaire (ISEH) basé sur le suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les nœuds de capteurs sans fil utilisés dans l'IOT, qui préfère utiliser l'énergie solaire et prend la batterie au lithium comme un complément en cas d'éclairage inadéquat. Pour prolonger la durée de vie de la batterie au lithium, un circuit intelligent utilisant des déclencheurs RS est proposé, qui ne charge la batterie au lithium que lorsque la tension de la batterie est inférieure à une valeur spécifique.[7]

- **Architecture d'un ISEH system** : Le système ISEH est physiquement composé de panneaux solaires, de batteries au lithium et de circuits de commande. Le circuit de commande comprend un module MPPT solaire, sous-circuit de charge, sous-circuit de protection contre les décharges excessives et module de suralimentation DC/DC pour batterie au lithium. Le système dispose de trois branches d'entrée, à savoir un panneau solaire, une batterie au lithium et une interface miniUSB. Il dispose également d'une branche de sortie fournie par une interface USB normale.[7]

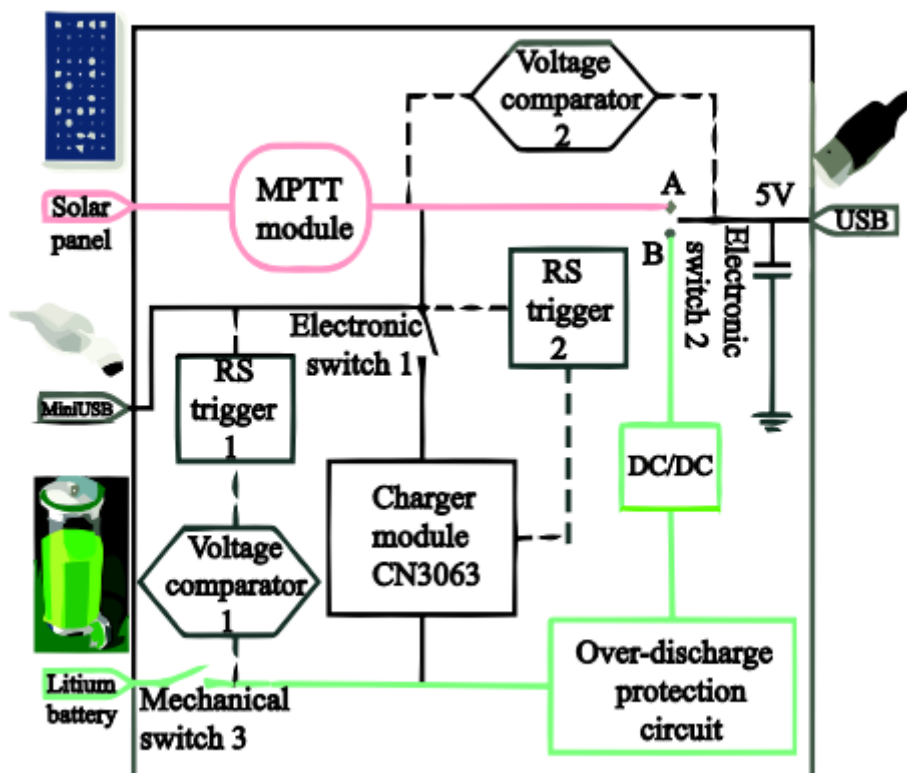


FIGURE 1.3 – Architecture d'un ISEH system.[7]

### 1.3.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est composé d'un grand nombre de capteurs autonomes capables de recueillir et de collaborer ensemble pour transmettre des données environnementales. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une région géographique, appelée zone de couverture ou "champ de détection". [8] Une station de base peut être un nœud fixe ou un nœud mobile capable de connecter le réseau de capteurs à une communication existante infrastructure ou à Internet où un utilisateur peut avoir accès aux données rapportées. [9]

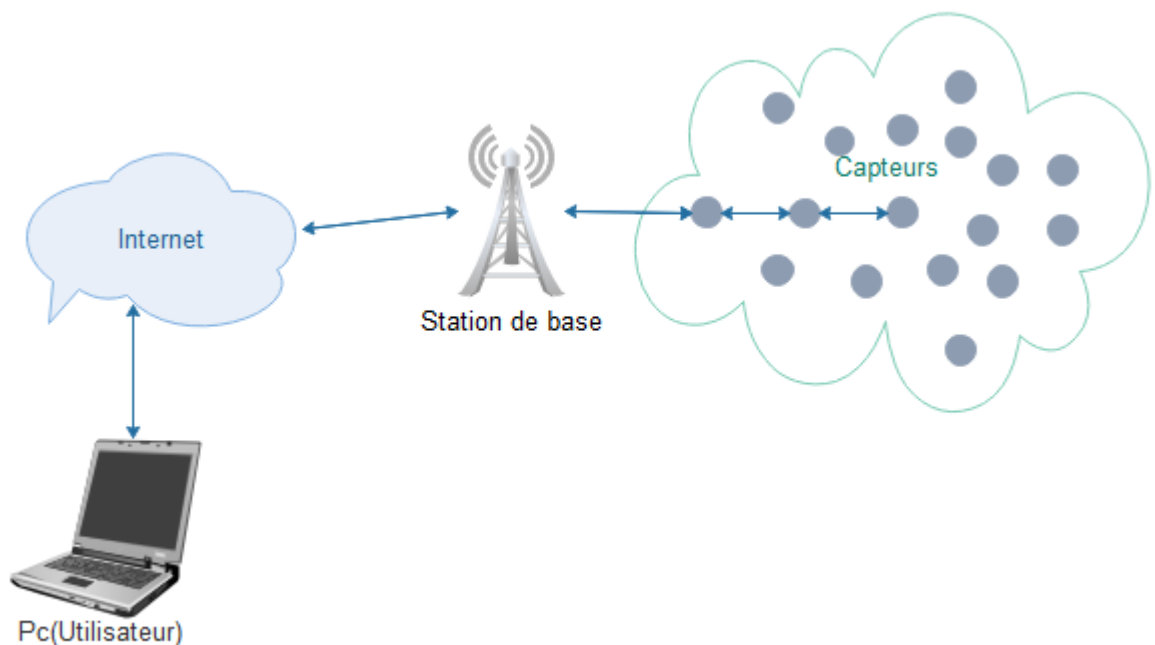


FIGURE 1.4 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [13]

## 1.4 Classification des réseaux de capteurs

Il existe plusieurs critères pour classer les réseaux de capteurs.

### 1.4.1 Approches basées sur le cycle d'activité

Ces approches concernent essentiellement les sous systèmes radio et de traitement qui font partie de l'architecture interne d'un nœud capteur. L'opération la plus efficace en terme de préservation d'énergie consiste à mettre en mode veille le module radio chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Lorsqu'il n'y a aucune donnée à envoyer ou à recevoir par le nœud capteur, le module de communication radio doit basculer vers le mode inactif et redeviendra actif chaque fois qu'il y a une présence d'une nouvelle donnée prête à être envoyée ou à recevoir. Le nœud dans ce cas bascule dans le temps entre les états actif et inactif et développe ainsi un comportement appelé cycle d'activité. Chaque nœud dans un voisinage d'un RCSF effectue des tâches coopératives avec d'autres nœuds, celles-ci nécessitent une coordination efficace dans la gestion des différents cycles d'activités correspondants, i.e. les différents basculements veille/réveil. Ainsi, des mécanismes de planification des modes veille/réveil doivent impérativement accompagner toute approche basée sur le concept de cycle d'activité. Ceci assurera une faisabilité d'échange de données entre les nœuds du voisinage.[10]

### 1.4.2 Approches dirigées par les données

Considérée comme approche préventive, l'opération d'agrégation effectue un traitement supplémentaire sur les données brutes captées depuis l'environnement. Un nœud agrégateur combine les données provenant de plusieurs nœuds en une information significative; ce qui réduit considérablement la quantité de données transmises, demande moins d'énergie et augmente ainsi la durée de vie du réseau.[11]

### 1.4.3 Approches basées sur la mobilité

Certains protocoles proposent comme solution tolérante aux pannes la sélection d'un ensemble de nœuds mobiles chargés de se déplacer entre les capteurs et collecter les données captées. Ceci réduira l'énergie consommée au niveau de chaque capteur en éliminant

sa tâche de transmission. Un nœud mobile est généralement doté d'une batterie plus importante que celle d'un nœud capteur.[11]

## 1.5 Caractéristique des réseaux de capteurs

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs [12], nous citons :

- **Durée de vie limitée** : Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent habituellement sans surveillance dans des régions géographiquement éloignées. Par conséquent recharger ou remplacer leurs batteries devient quasiment impossible.
- **Ressources limitées** : Habituellement, les nœuds capteurs ont une taille très petite, ce facteur de forme limite la quantité de ressources qui peuvent être mises dans ces nœuds. En conséquence, la capacité de traitement et de mémoire est très limitée.
- **Topologie dynamique** : La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide car : les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (par exemple un champ de bataille). La défaillance d'un nœud capteur peut donc être très probable. De plus, les nœuds capteurs et les nœuds finaux où ils doivent envoyer l'information capturée peuvent être mobiles.
- **Agrégation des données** : Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs sont très reliées, ce qui implique l'existence de redondances de données. Une approche répandue consiste à agréger les données au niveau des nœuds intermédiaires afin de réduire la consommation d'énergie lors de la transmission de ces données.
- **Scalabilité** : Les réseaux de capteurs engendrent un très grand nombre de capteurs, ils peuvent atteindre des milliers voir des millions de capteurs. Le défi à relever par les RCFSs est d'être capable de maintenir leurs performances avec ce grand nombre de capteurs.
- **Bande passante limitée** : En raison de la puissance limitée, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés.
- **Sécurité physique limitée** : cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui minimisent le contrôle des données transmises.



## 1.6 Domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil

Grâce aux évolutions de la technologie touchant les domaines : électronique, informatique industrielle, instrumentation, réseaux et télécommunication, le champ d'applications des réseaux de capteurs sans fils est de plus en plus en élargissement. Parmi les applications des RCSF nous trouvons [3] :(Voir le figure 1.5)

### 1.6.1 Les Applications Militaires

Les militaires ont été des précurseurs dans le domaine de la recherche sur les réseaux de capteurs . Pour cette institution , un réseau de capteurs offre des avantages très précieux, a s'avoir le contrôle des équipements et munitions, la communication à bas coût entre les unités avec une logistique peu compliquée, reconnaissance et surveillance d'un champ de bataille ainsi qu'une estimation très rapide et évolutive des dégâts encourus en temps de crise.[13]

### 1.6.2 Les applications Médicales

Le champ de contrôle de santé représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces RCSF peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain telle que la détection du cancer à une étape précoce, grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telle que la tension artérielle, à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière.[14]

### 1.6.3 Les applications Environnements

Les applications d'environnement qui peuvent bénéficier de la technologie des réseaux de capteurs sans fil, on peut citer par exemple, le cheminement des mouvements d'oiseaux ; les macro-instruments utilisés pour la surveillance des terrains à grande échelle et les explorations planétaires ; la détection chimique et biologique.[13]

### 1.6.4 Les application d'agriculture de précision

Les réseaux de capteurs sont capables d'apporter des bénéfices considérables au domaine d'agriculture, grâce à leur habilité de surveiller les taux de pesticides dans l'eau, le degré d'érosion du sol, détection de parasites, et le niveau de pollution de l'air en temps réel.[15]

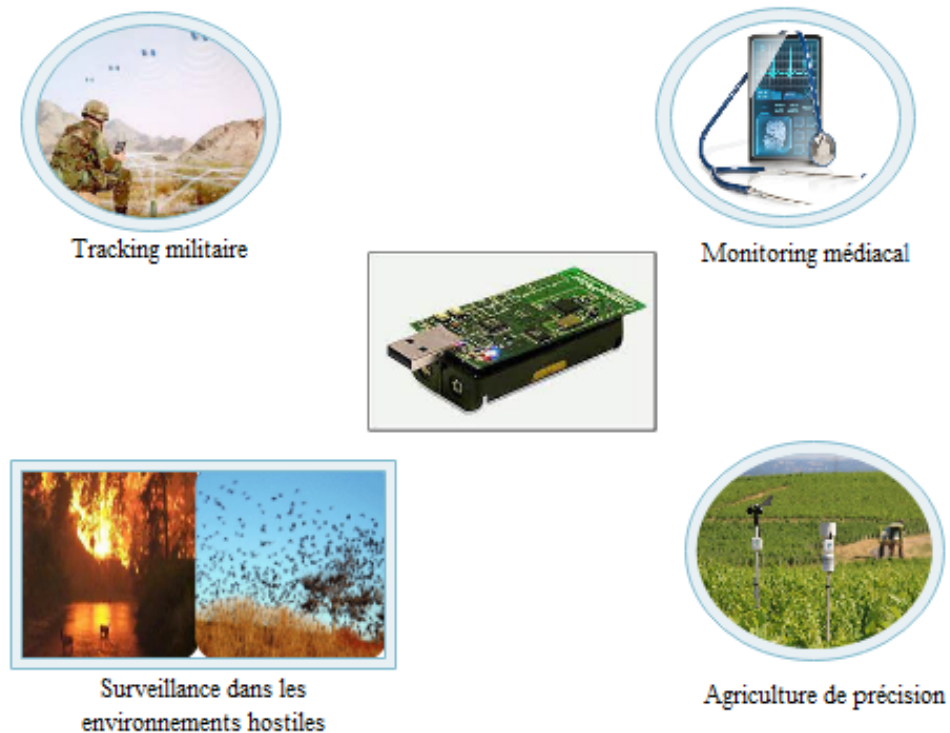


FIGURE 1.5 – Domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil [15]

## 1.7 Pile protocolaire

La pile Protocolaire référencée au modèle de couche OSI(Open Système Interconnexion),elle utilisée par la station de base et les autres capteurs du réseau de capteurs comprend cinq couches qui sont :(Voir le figure 1.6)

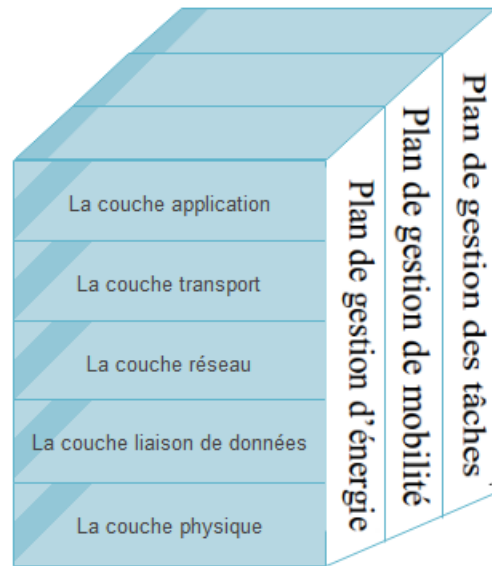


FIGURE 1.6 – Pile protocolaire [3]

- **La couche physique** : la couche physique est responsable de la sélection de la fréquence, est assurée la transmission et la réception des données.
- **La couche Liaison de données** : Cette couche parmi d'assuré la gestion des erreurs et contrôle d'accès au support de transmission MAC (Media Access Control), pour un bonne transmission des données.
- **La couche réseau** : Elle s'occupe du routage et transmission des données.
- **La couche transport** : La couche transport supervise le coupage et transport de données, contrôle de flux.
- **La couche Application** : Cette couche est le point d'accès des application aux services réseau.

Aux niveaux de plans dans la pile protocolaire dans les RCSFs, on a les fonctions suivants :

- **Le plan de gestion d'énergie** : Est responsable de la gestion de puissance d'un nœud capteur, au niveau de la détection, du traitement et de la communication. [3]
- **Le plan de gestion de mobilité** : Est responsable de la configuration et la re-configuration des nœuds pour établir ou maintenir la connectivité réseau. [3]
- **Plan de gestion des taches** : Est responsable de la répartition des tâches entre les nœuds pour améliorer l'efficacité de l'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau. [3]

## 1.8 Consommation d'énergie dans les RCSF

### 1.8.1 Les principes opérations dues à la consommation d'énergie

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication.[5]

- **Énergie de capture** : Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture .[16]
- **Énergie de traitement** : L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication.[5]
- **Énergie de communication** : L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur. [5]

## 1.8.2 Modèle de consommation d'énergie

Heinzelman et Al [16] ont proposé un modèle radio de consommation d'énergie. Ainsi les énergies nécessaires pour émettre  $ETx(s, d) = 50 \text{ nJ/bit}$  (où  $1 \text{ nJ} = 10^9$ ) et recevoir  $ERx(s) = 100 \text{ pJ/bit}$  (où  $1 \text{ pJ} = 10^{12} \text{ J}$ ) des messages sont données comme suit :

Pour émettre un message de  $s$  bits vers un récepteur loin de  $d$  mètre, l'émetteur consomme :

$$ETx(s, d) = ETx_{elec}(s) + ETx_{amp}(s, d) \quad (1, 1)$$

$$ETx(s, d) = (E_{elec} * s) + (E_{amp} * s * d^n) \quad (1, 2)$$

Pour recevoir un message de  $s$  bits, le récepteur consomme :

$$ERx(s) = ERx_{elec}(s) \quad (1, 3)$$

$$ERx(s) = E_{elec} * s \quad (1, 4)$$

Avec :

**E<sub>elec</sub>** : énergie de transmission/réception électronique ;

**s** : taille d'un message ;

**d** : distance entre l'émetteur et le récepteur ;

**n** : prendre la valeur 2 ou 4 selon la distance de transmission ;

**E<sub>amp</sub>** : représente l'énergie d'amplification ;

La figure ci-dessous illustre ce modèle de consommation d'énergie.

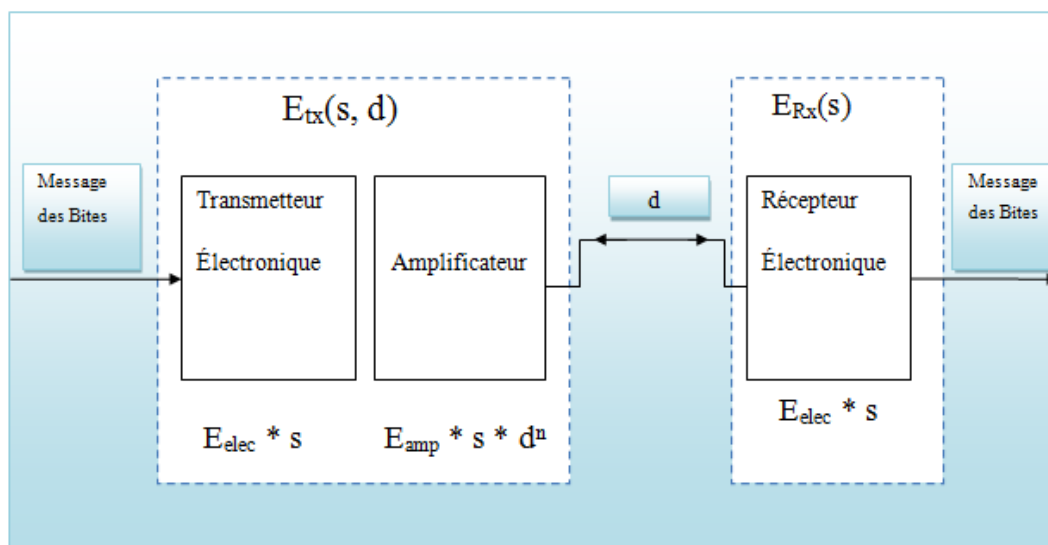


FIGURE 1.7 – Modèle de consommation d'énergie. [16]

### 1.8.3 Modèle de source énergie

Nous supposons que l'énergie environnementale (comme l'énergie solaire) est collectée et convertie en énergie électrique pour compléter les batteries du système du véhicule.

Afin de simuler le comportement de la source solaire, nous utilisons le modèle suivant :[17]

$$\rho(s) = \left| 0.9 * R(t) * \cos\left(\frac{t}{7 * \pi}\right) * \cos\left(\frac{t}{10 * \pi}\right) \right| \quad (1,5)$$

Où :

$R(t)$  représente une variable aléatoire uniformément répartie entre 0 et 1. Coupez la valeur  $P_s$  à valeur  $P_s$ , la valeur maximale = 0,9. Comme le montre la figure, la courbe La puissance  $P_s(t)$  obtenue en simulant le jour et la nuit est similaire à celle des cellules environnement extérieur solaire.

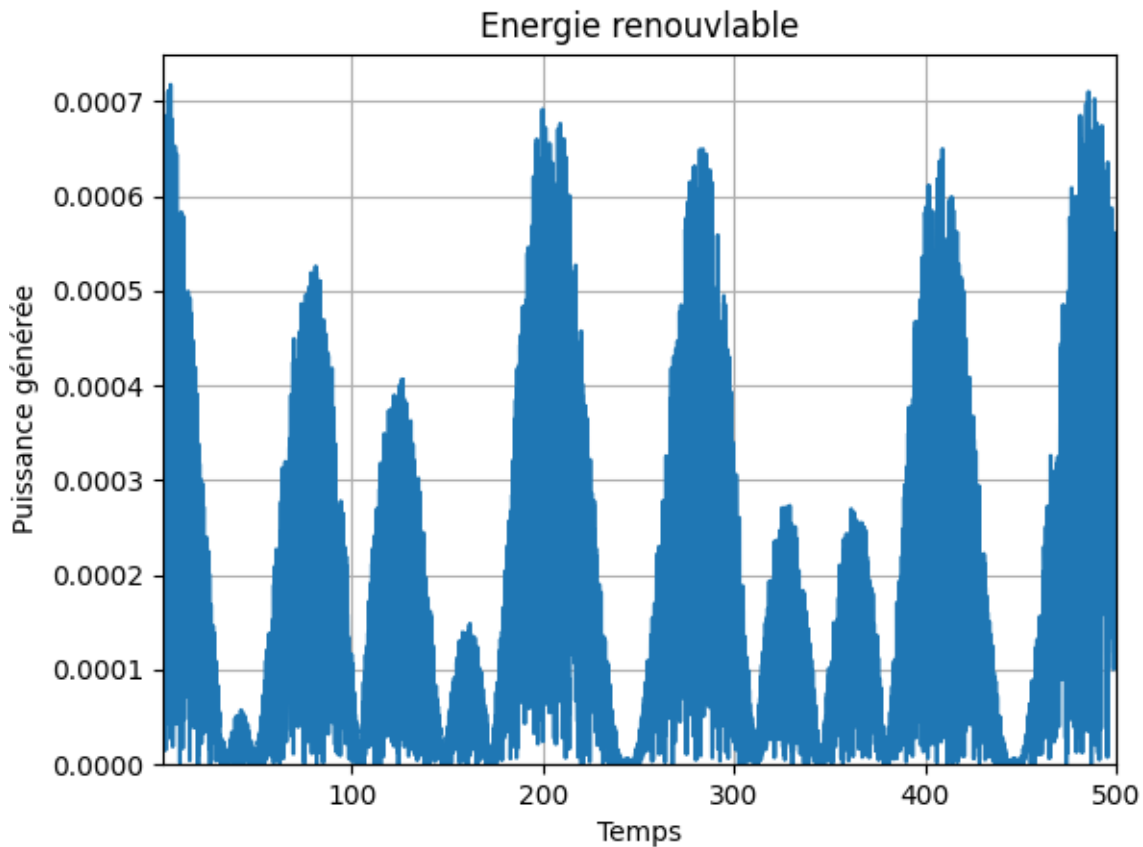


FIGURE 1.8 – La courbe de la puissance  $P_s(t)$ .

## 1.9 Modèle hétérogène pour les réseaux de capteurs sans fil

Dans cette section, nous introduisons le paradigme du réseau de capteurs sans fil hétérogène et renversons l'impact des ressources.[18]

### 1.9.1 Type d'hétérogénéité des ressources

Il existe trois types courants d'hétérogénéité des ressources dans les nœuds de capteurs : l'hétérogénéité de calcul, l'hétérogénéité des liens et l'hétérogénéité de l'énergie.

- **Hétérogénéité des calculs** : signifie que le nœud hétérogène a un plus puissant microprocesseur et plus de mémoire que le nœud normal. Avec les puissantes ressources de calcul, les nœuds hétérogènes peuvent fournir un traitement de données complexe et un stockage à plus long terme .
- **Hétérogénéité des liens** : signifie que le nœud hétérogène a une bande passante élevée et une longue distance émetteur-récepteur réseau que le nœud normal. L'hétérogénéité des liens peut fournir des données plus fiables transmission.
- **Hétérogénéité énergétique** : signifie que le nœud hétérogène est alimenté en ligne ou que sa batterie est remplaçable. Parmi les trois types d'hétérogénéité des ressources ci-dessus, l'hétérogénéité la plus importante est l'énergie l'hétérogénéité car l'hétérogénéité des calculs et l'hétérogénéité des liens consommeront plus ressource énergétique.

### 1.9.2 Impact de l'hétérogénéité sur les réseaux de capteurs sans fil

Si nous plaçons des nœuds hétérogènes dans le réseau de capteurs, cela montre les avantages suivants :

- **Temps de réponse** : L'hétérogénéité de calcul peut réduire la latence de traitement et l'hétérogénéité des liens peut réduire le temps d'attente, donc le temps d'autoclave est diminué.
- **Durée de vie** : la consommation d'énergie moyenne sera inférieure dans des réseaux de capteurs hétérogènes pour transmettre un paquet des nœuds normaux au récepteur, donc la vie le temps est augmenté. De plus, il est également connu que si dans un réseau, l'hétérogénéité est utilisée correctement alors la réponse du réseau est triplé et la durée du réseau peut être multiplié par 5.

### 1.9.3 Mesures de performance

Certaines mesures de performance utilisées pour évaluer les performances des protocoles de clustering sont énumérées ci-dessous.

- **Durée de vie du réseau** : C'est l'intervalle de temps entre le début de l'exploitation (du réseau de capteurs) et la mort du premier nœud actif.
- **Nombre de têtes de cluster par tour** : la mesure instantanée reflète le nombre de nœuds qui enverraient directement au puits, des informations agrégées à partir de leurs membres de cluster.
- **Nombre de nœuds par tour** : Cette mesure instantanée reflète le nombre total de nœuds et celui de chaque type qui n'a pas encore dépensé toute son énergie.
- **Débit** : cela comprend le débit total de données envoyées sur le réseau, le débit de données envoyées des têtes de cluster à l'évier ainsi que le débit de données envoyées des nœuds à leurs têtes de cluster.



## 1.10 Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil et leur architecture, différentes classifications, caractéristiques et les domaines d'application . Après cela, nous avons défini les différentes opérations dues à la consommation d'énergie des nœuds, aux modèles de source d'énergie et le modèle hétérogène pour RCSF .

Dans le chapitre suivant, nous parlerons sur les protocoles de routage dans les RCSFs existants.

# Routage dans les réseaux de capteur sans fil

## 2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont été développés pour interagir avec l'environnement externe. Cependant, avant que ces réseaux puissent effectuer leurs tâches au mieux de leurs capacités, de nombreux problèmes doivent encore être résolus. Cela inclut les problèmes de routage, qui impliquent de déterminer et de maintenir le chemin le plus approprié de la source à la destination pour obtenir le paquet de données. Cette fonction doit donc tenir compte des caractéristiques inhérentes au capteur (limitation de puissance, limitation de calcul, capacité mémoire) pour assurer les meilleures performances du système : durée de vie, fiabilité, temps de réponse, etc. L'objectif principal de ce chapitre est d'introduire un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil hétérogènes avec et sans énergie renouvelable.

## 2.2 Définition de routage

Le routage est le processus de sélection d'un chemin pour transmettre des données de l'expéditeur à un ou plusieurs destinataires via un ou plusieurs réseaux. Elle s'applique à tout type de réseau, des réseaux téléphoniques aux réseaux de données électroniques (comme Internet) aux transports en commun. .. etc .

Le but du routage est d'obtenir un paquet IP (Internet Protocol) d'une station à une autre. Ces décisions de routage Internet sont prises par des périphériques réseau dédiés appelés routeurs.

## 2.3 Le routage dans les RCSFs

### 2.3.1 Définition

La diffusion et la livraison des données dans RCSF est la fonction la plus importante du réseau. Il doit tenir compte de toutes les caractéristiques des capteurs pour assurer les meilleures performances du système : durée de vie, fiabilité, temps de réponse... etc.

Le problème de routage est de déterminer le meilleur itinéraire à travers Un réseau au sens d'une certaine norme de performance. Le problème est de trouver investissement à coût minimum en capacité nominale et en réserves pour assurer le routage du trafic nominal et garantit sa survie en cas de panne d'arc ou de nœud. Le problème qui se pose dans les réseaux ad hoc est l'adaptation des méthodes routage utilisé avec un grand nombre de cellules présentes dans l'environnement caractérisé par des capacités de calcul et de stockage modérées et des changements rapides de topologie. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive étudier les problèmes suivants :

1. La minimisation de la charge du réseau.
2. Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables.
3. Assurer un routage optimal.
4. Offrir une bonne qualité concernant le temps de latence.[19]

## 2.4 Classification protocoles de routage dans les RCSFs

Le routage dans les RCSF a une importance capitale car son succès et son efficacité permet de conserver l'énergie et les ressources dans le réseau, et par conséquent, maximiser la durée de vie du réseau. Récemment, des recherches approfondies ont été menées sur les protocoles de routage RCSFs. Les méthodes employées peuvent être classifiées suivant quatre critères : la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement de la route et l'initiateur de communication.

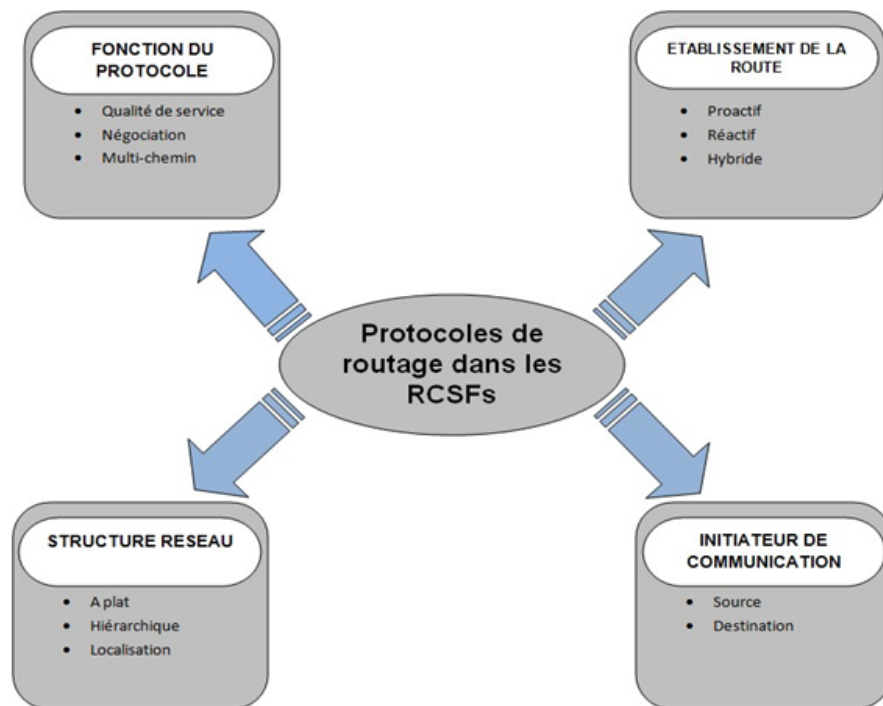


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routage. [24]

### 2.4.1 Classification selon la structure réseau

La structure du réseau peut jouer un rôle important dans le fonctionnement du protocole de routage dans les RCSF. Les protocoles de cette classe peuvent être classifiés en trois catégories : Protocole à plat, Protocole hiérarchique et Protocole basé sur la localisation.

- **Protocole à plat** : Appelés également routage centré données c'est la première approche utilisée dans l'acheminement des données dans les RCSF où tous les nœuds ont les mêmes tâches à accomplir (homogènes) et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire. La collecte des données est à la charge du nœud puits, ce dernier collecte les données issues des différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers les centres de traitement. Cette catégorie des protocoles est caractérisée par la simplicité des algorithmes exécutés d'où la possibilité d'établir des communications sans sur coût et de construire différents chemins des sources vers le nœud puits, car chaque nœud n'aura besoin que des informations de ses voisins directs. Cependant, l'inconvénient est l'épuisement des ressources en énergie des nœuds proches

au nœud puits car les informations collectées passent forcément par les nœuds qui entourent ce dernier.[20]

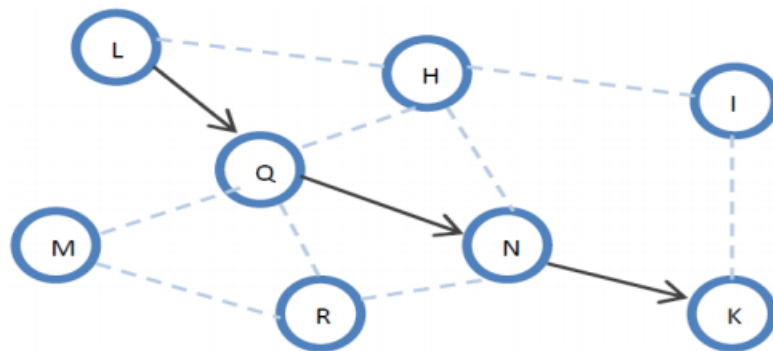


FIGURE 2.2 – Routage plat.[21]

- **Protocole hiérarchique** : Dans les RCSF, la majorité des protocoles de routage sont des protocoles hiérarchiques. Ces protocoles sont conçus dans le but de réduire la consommation d'énergie lors de l'établissement de routes et surtout dans les réseaux à grande échelle. Le routage hiérarchique permet de partitionner le réseau en sous ensemble pour faciliter la gestion du réseau et préserver par la suite l'énergie. Le partitionnement du réseau permet d'organiser le réseau de telle sorte chaque sous ensemble de nœuds a un super nœud appelé cluster-head. Ce dernier gère cet ensemble de nœuds et communique avec d'autres cluster-heads.[22]

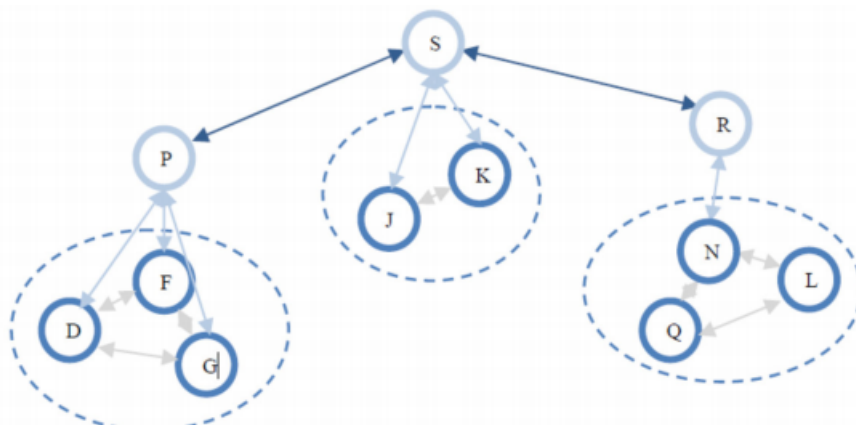


FIGURE 2.3 – Routage hiérarchique.[21]

- **Protocoles basés sur la localisation** : Dans ce type de routage, les nœuds de capteurs sont adressés au moyen de leurs emplacements. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base des intensités du signal entrant. Les coordonnées relatives des nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant de telles informations entre voisins. Alternativement, l'emplacement des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite, en utilisant le GPS.

[23] Ce type de protocoles, minimise la consommation d'énergie, car il élimine les transmissions inutiles en envoyant les requêtes de la station de base vers des régions bien précises. Mais en contre partie, il exige une administration centralisée pour le calcul des positions des nœuds et du souffre du manque de précision dans le récepteur GPS, ainsi que la consommation élevée de l'énergie.[24]

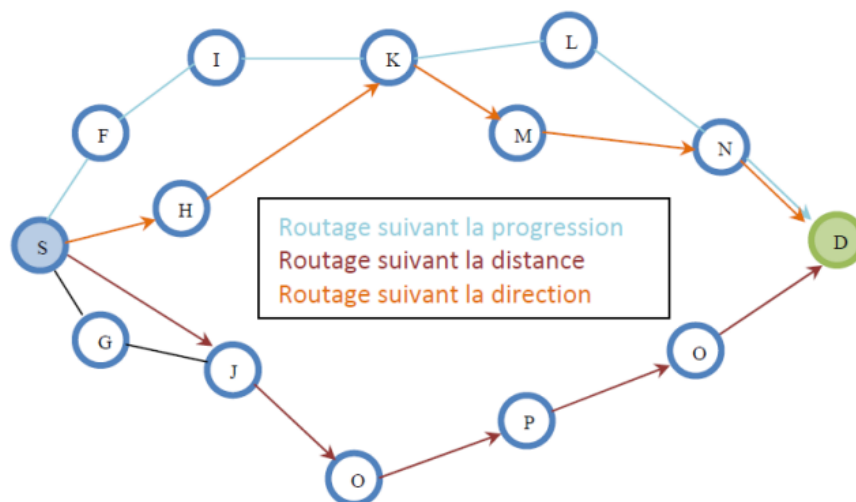


FIGURE 2.4 – Routage basé sur la localisation.[21]

## 2.4.2 Classification selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être initiée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

- **Communication lancée par la source** : Dans les protocoles lancés par la source, les nœuds envoient des données à la destination. Ces protocoles utilisent les données rapportées en fonction du temps (time-driven) ou d'évènements (event-driven). Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds perçoivent certains événements. [25]

- **Communication lancée par la destination :** Les protocoles de communication lancée par la destination utilisent les données rapportées avec query-driven, et dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région.[25]

### 2.4.3 Classification selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparée en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

- **Protocole proactif :** Dans les protocoles proactifs, les informations des chemins à suivre par chaque donnée source vers une destination sur le réseau sont stockées dans une table de routage, toutes les routes sont calculées avant qu'elles ne soient vraiment nécessaires se fait à priori ce qui facilite l'acheminement des données. Les tables de routage doivent être mises à jour régulièrement pour corriger l'intersection de certains chemins en raison d'un changement de topologie dû à une défaillance ou à la mobilité de certains nœuds de capteur. [26]
- **Protocole réactif :** Les protocoles de routage de cette catégorie créent et gèrent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'un itinéraire, une procédure de découverte d'itinéraire est lancée.[27]
- **Protocole hybride :** L'utilisation de protocoles de routage purement proactifs ou totalement réactifs crée des problèmes dans certaines situations, ces problèmes ont conduit les chercheurs à concevoir un troisième type de protocoles de routage appelé protocole de routage hybride qui est basé sur le concept de partitionnement de réseau, ce type de protocoles combine les avantages de les deux types de protocoles précédents dans le plan hybride.[27]

### 2.4.4 Classification selon les fonctionnalités du protocole

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en trois catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Qualité de service), routage basé sur des multi-chemins, et routage basé sur la négociation.

- **Routage basé sur la qualité de service** : Le principe des protocoles de routage basé sur la QoS est basé essentiellement sur le fait que le réseau doit être capable de satisfaire certaines métriques de QoS , pendant la transmission des données vers la destination finale (les délais, l'énergie, bande passante ,etc).
- **Routage basé sur la négociation de données** : Les nœuds de réseau initient la négociation des données à transmettre en diffusant un message contenant des métadonnées décrivant les données à transmettre. Les nœuds intéressés par ces données expriment leur intérêt et les reçoivent intégralement. La sélection des nœuds cibles par intérêt réduit la bande passante du réseau et la consommation d'énergie. Cette méthode élimine les transmissions redondantes et établit des communications en fonction des ressources du réseau. [26]
- **Routage Multi-chemin** : Ces protocoles prennent en charge plusieurs routes pour augmenter les performances du réseau, améliorer la fiabilité de la transmission des données, fournir un routage tolérant aux pannes et contrôler la prise en charge de la qualité de service dans RCSF.[20]

## 2.5 Les facteur de conception de protocoles de routage

- **Tolérance aux pannes** :Tolérance aux pannes : La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruption due à une panne d'un noeud capteur.

Le but de la tolérance aux pannes est d'éviter la faille totale du système, même s'il y a des pannes dans un sous-ensemble de ses composants de base.[28]

- **Facteur d'échelle(Scalabilité)** : De nombreuses applications de RCSF nécessitent généralement un déploiement très dense de milliers. Ce déploiement intensif entraîne une surcharge des capteurs de nœuds de réseau. Par conséquent, le nombre de nœuds



déployés pour certaines applications peut être plus élevé. Par conséquent, quelle que soit la charge, le protocole de communication doit garantir le fonctionnement du réseau.[29]

- **Déploiement de nœud** :Le déploiement de nœuds dans WSN dépend de l'application et affecte les performances du protocole de routage. Le déploiement peut être déterministe ou aléatoire. Dans un déploiement déterministe, les capteurs sont placés manuellement et les données sont acheminées via un chemin prédéterminé. Cependant, lors du déploiement de nœuds aléatoires, les nœuds de capteurs sont dispersés de manière aléatoire, créant une infrastructure de manière temporaire. Si la distribution des nœuds résultante est inégale, une mise en cluster optimale doit être effectuée pour atteindre la connectivité et réaliser un fonctionnement du réseau économe en énergie. En raison des limitations de puissance et de bande passante, la communication entre les capteurs se situe généralement dans une courte portée de transmission.[23]
- **Agrégation des données** :La méthode d'agrégation de données a été proposée comme un nouveau paradigme utile pour le routage dans les réseaux de capteurs. L'idée de base de cette méthode est de combiner les données de différents nœuds sources en éliminant la redondance existante et de minimiser le nombre de transmissions possibles pour économiser la consommation d'énergie.[30]
- **Connectivité** :Les plages de communication et l'emplacement physique de chaque nœud de capteur définissent la connectivité d'un réseau. S'il y a toujours une connexion réseau entre deux nœuds (peut-être plusieurs sauts), alors le réseau est dit connecté. La connectivité affecte principalement la conception des protocoles de communication et des méthodes de collecte de données.[31]
- **Mobility** :Le routage dans des environnements mobiles devient très difficile car les paquets de données doivent être acheminés vers et depuis le nœud mobile. Dans ce cas, la stabilité de la trajectoire est aussi importante que l'économie d'énergie.[32]
- **Consommation d'énergie** :L'une des contraintes les plus importantes dans les RCSFs est l'exigence de faible consommation d'énergie par le nœud capteur. Les capteurs sont équipés par une batterie avec une source d'énergie limitée. Ces batteries souvent non remplaçable ni rechargeable contrairement de réseaux sans fil traditionnel où le rechargement des batteries des équipements sans fil est très fa-

cile, tel que les téléphones portable. Dans un réseau de capteurs, chaque nœud collecte des données et transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques capteurs ou la mort de son batterie nécessite une modification de la topologie du réseau et un Réacheminement des paquets. Toutes ces opérations consomment beaucoup d'énergie, C'est pourquoi la recherche actuelle se concentre principalement sur le développement des algorithmes et des protocoles ayant comme but l'économie d'énergie.[33]

## 2.6 Le routage dans les RCSF sans énergie renouvelable

### 2.6.1 Quelques protocoles de routage hiérarchiques utilisés dans les RCSF

#### Protocoles de routage classique

##### 1. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est l'un des plus célèbres protocoles de routage pour RCSFs. C'est un protocole de routage hiérarchique basé sur la formation de cluster (groupe), L'idée est de regrouper les nœuds du réseau en clusters. Un nœud est élu cluster-head ou chef de groupe CH. Son rôle est de collecter les informations capturées par ses membres et les acheminer à la station de base BS, ce qui sauvegarde l'énergie des autres capteurs.[34]

##### A) Fonctionnement de LEACH

LEACH est divisé en deux phases principales : la phase de configuration et la phase de transmission.

a) **La phase de configuration** : Lors de la phase de configuration, les nœuds cluster-head sont élus et les clusters sont formés. Un nœud détermine son cluster en choisissant le CH qui peut être atteint avec le moins de consommation d'énergie de communication.

- La sélection de CH : L'élection des cluster-heads se déroule comme suit : chaque nœud choisit un nombre de manière aléatoire entre 0 et

1. Si cette valeur est inférieure à un seuil  $T(n)$  le nœud devient cluster-head. Le seuil est défini comme suit :[34]

$$T(n) = \begin{cases} p/(1-p) * r(\text{mod}(1/p)) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2,1)$$

Où :

$p$  : pourcentage souhaité de nœud à devenir un CH.

$r$  : Numéro de tour courant.

$G$  : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus CH pendant les  $1/p$  tours précédents.

- Formation de cluster : Un nœud détermine son cluster en choisissant le CH qui peut être atteint avec le moins de consommation d'énergie de communication. Une fois les cluster-head élus et les clusters formés, on passe à la phase de transmission.

#### b) La phase de transmission

Lors de la phase de transmission les nœuds envoient leurs données au cluster-head du cluster auquel ils appartiennent, ensuite le cluster-head agrège toutes les données et envoie le paquet de données à la station de base. Au début de la phase, un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) permet d'assigner à chaque nœud un slot de temps pour la transmission de ses données. Dans le souci d'économiser l'énergie, les nœuds simples i.e. qui ne sont pas cluster-head sont actifs uniquement durant leur temps de transmission, le reste du temps ils mettent leur radio en veille. Le cluster-head par contre est tout le temps actif pour recevoir les données des autres membres du cluster. A la fin du round (tour), on démarre un autre round avec une nouvelle phase de configuration. Les nœuds qui étaient cluster-head durant le round précédent ne peuvent pas être réélus de nouveau.[34]

#### B) Interférences entre clusters

Afin de réduire les interférences entre les signaux émis par les membres de différents clusters, chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA et informe ses membres de son cluster afin de

l'utiliser dans leurs transmissions. Chaque CH reconnaît les signaux de ses membres à travers ces codes.

## Protocoles de routage hétérogène

1. **Le protocole de routage MCR (Multi-hop communication routing)** Un protocole de routage de communication multi-sauts économe en énergie. MCR fournit l'équilibrage de charge, l'amélioration de la durée de vie, la stabilité et l'efficacité énergétique pour les HWSN donnés, proposé par [35]. MCR calcule d'abord le nombre optimal de CHs  $k_{opt}$  dans le réseau en fonction de la longueur latérale de la zone de détection, des numéros de nœuds et du multiple de l'amplificateur émetteur.

- Les probabilités pondérées des élections CH : Le protocole MCR utilise à la fois la transmission à saut unique et la transmission à sauts multiples dans le réseau. Les CH sont choisis sur la base des mêmes formules de probabilité pondérée que celles utilisées dans EEHC. Les nœuds membres du cluster communiquent avec le CH en utilisant une communication à saut unique et le CH communique avec le puits via une communication à sauts multiples en choisissant le CH approprié le plus proche du puits comme prochain saut. Dans MCR, les nœuds normaux, les nœuds avancés et les super nœuds sont déployés de manière aléatoire ensemble dans la zone de détection pour créer le HWSN. Les nœuds avancés ont plus d'énergie initiale que les nœuds normaux, et les super nœuds ont plus d'énergie initiale que les nœuds avancés. Les auteurs considèrent que  $m_0$  pourcentage de  $n$  nœuds sont des super nœuds qui ont initialement  $\beta$  fois plus d'énergie initiale que les nœuds normaux et le  $n*m_0*(1 - m_0)$  fraction des nœuds totaux sont des nœuds avancés qui ont initialement  $\alpha$  fois plus d'énergie initiale que les nœuds normaux, et le pourcentage restant  $(1 - m_0)$  des nœuds totaux est des nœuds normaux.  $n$  est le nombre total de nœuds capteurs.  $E_0$  est défini comme l'énergie initiale du nœud normal; alors, l'énergie initiale de chaque super nœud et de chaque nœud avancé devrait être respectivement  $E_0(1 + \beta)$  et  $E_0(1 + \alpha)$ . Comme décrit ci-dessus, l'énergie totale de l'ensemble HWSN peut être  $E_{total} = nE_0(1 + (\alpha - m_0(\alpha - \beta)))$ . Comme nous pouvons le voir sur  $E_{total}$ , l'énergie initiale totale est augmentée  $1 + (\alpha - m_0(\alpha - \beta))$  fois par rapport au réseau homogène. Pour s'assurer que l'élection des CH du réseau est

stable, ce qui signifie que ces trois types de nœuds élisent les CH séparément, la nouvelle époque optimale est définie comme :

$$\rho_{normal} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m0(\alpha - \beta))} \quad (2,6)$$

$$\rho_{advanced} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m0(\alpha - \beta))} * (1 + \alpha) \quad (2,7)$$

$$\rho_{super} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m0(\alpha - \beta))} * (1 + \beta) \quad (2,8)$$

avec :

$$\rho_{opt} = \frac{k_{opt}}{N}$$

$k_{opt}$ =Le numéro d'optimal des cluster heads.

$N$ =Le numéro de nœud.

- Formation de cluster : Dans la phase de formation de cluster, les nœuds non-CH rejoignent le CH le plus proche simplement en détectant le RSSI qui dépend du signal reçu des CH. Une fois que les nœuds ont complètement rejoint les clusters, un slot TDMA est nécessaire pour chaque cluster, et chaque nœud CH envoie le slot TDMA à ses nœuds membres pour leur dire quand ils peuvent transmettre les données.
- Sélection d'itinéraire : Dans la phase de sélection de route, un nœud CH agrège les données des nœuds membres et transmet ensuite les données au puits sur un chemin à sauts multiples. Parce que le chemin le plus court aura le coût énergétique le plus bas, un CHnode choisit un autre CH comme prochain saut dont la distance à parcourir est la plus courte.
- Transmission de données : phase de transmission de données, un nœud CH collecte et agrège les données de ses nœuds membres dans le créneau TDMA fixe. Après cela, le CH transmet les données au puits sur le chemin précédemment multi-sauts dans la phase de sélection de route.

2. **Le protocole CRSH( cluster-based routing scheme for heterogeneous network)** Le protocole CRSH sélectionne le nœud le plus économe en énergie comme CH en utilisant l'énergie des nœuds. La tâche d'agréger les données dans le schéma CRSH proposé est effectuée par le CH dans chaque cluster. Les données redondantes détectées par les divers nœuds sont éliminées en utilisant les fonctions d'agrégation

de données et toutes les données d'un cluster sont fusionnées en un seul paquet et transmises à la BS par le CH. Le processus de regroupement et d'agrégation des données dans le protocole CRSH proposé est effectué en trois Phases, à savoir Phase d'initialisation, Phase de Clustering et Phase d'agrégation des données. Après avoir effectué les trois étapes, les données agrégées sont transmises à la BS.[36]

- Phase d'initialisation Dans cette étape, le déploiement aléatoire des nœuds est effectué dans la zone de travail pour l'initialisation du protocole CRSH. L'exécution de l'étape d'initialisation n'est effectuée qu'une seule fois lors du démarrage du réseau. L'énergie initiale des nœuds est attribuée à cette étape. Le modèle hétérogène est utilisé pour mettre en œuvre le protocole CRSH proposé dans lequel les nœuds sont séparés en deux types en fonction de leurs énergies initiales. Les nœuds du schéma proposé sont classés comme nœuds normaux et avancés. Les nœuds avancés reçoivent une énergie supplémentaire par rapport aux nœuds normaux. Les énergies des nœuds sont données comme suit :[36]

— Nœuds normaux :  $E_{norm} = E_0$

— Nœuds avancés :  $E_a = E_0 (1 + \alpha)$

— L'énergie globale du réseau est donnée comme suit :

$$n * E_0 (1 - m) + n * m * E_0 (1 + a) = n * E_0 (1 + a * m) \text{ où}$$

a : facteur d'énergie supplémentaire affecté aux nœuds avancés.

$E_0$  : l'énergie initiale .

n : le nombre total de nœuds.

m : le nombre de nœuds avancés qui reçoivent une énergie supplémentaire par rapport aux nœuds normaux.

(1 - m) : les nœuds normaux restants dans le réseau.

$n * E (1 - m)$  : l'énergie du nœud normal.

$n * m * E_0(1 + a)$  : est l'énergie des nœuds avancés .

- Phase de Clustering Dans cette étape, les nœuds sont répartis dans différents clusters et pour chaque cluster un CH est attribué. Le CH accumule les valeurs détectées de tous les membres du cluster. CRSH se concentre sur la sélection d'un nœud efficace en tant que CH à chaque tour. Le modèle de réseau hétérogène est utilisé dans le protocole CRSH proposé pour effectuer

le processus de regroupement. Les nœuds sont divisés en deux classes : les nœuds normaux et avancés. Les nœuds avancés sont équipés d'une énergie supplémentaire par rapport aux nœuds normaux. Le nœud démarre la routine de clustering en générant une valeur aléatoire comprise entre zéro et un. La valeur aléatoire générée du nœud est ensuite comparée à la fonction de seuil. Si la valeur aléatoire est inférieure au seuil, les nœuds gèrent les tâches CH pour ce tour. La fonction de seuil du nœud normal, avance est donnée par :

$$T(n_{norm}) = \begin{cases} p_{norm}/(1 - p_{norm}) * (rmod(1/p_{norm})) * (E_{initial}/E_{residual}) & si \quad n \in G \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (2, 9)$$

$$T(n_{adv}) = \begin{cases} p_{adv}/(1 - p_{adv}) * (rmod(1/p_{adv})) * (E_{initial}/E_{residual}) & si \quad n \in G \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (2, 10)$$

où :

$P_{norm}$  et  $P_{adv}$  : la valeur de probabilité de sélection CH dans les nœuds normaux, avancés.

$E_{initial}$  et  $E_{residual}$  : les niveaux d'énergie (initial et résiduel).

$G$  : l'ensemble des nœuds non CH.

$P_{norm}$  et  $P_{adv}$  est donné comme :

$$\rho_{normal} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))} \quad (2, 11)$$

$$\rho_{advanced} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))} * (1 + \alpha) \quad (2, 12)$$

où :

$P_{opt}$  désigne la probabilité de sélection CH (optimale).

Les nœuds qui sont devenus le CH envoient un message publicitaire à tous les nœuds voisins de leur portée. Le nœud rejoint le CH en envoyant un message de demande de jonction au CH pour la formation du cluster. Les nœuds non-CH rejoignent leur CH le plus proche en fonction de la force du signal du message reçu et forment un cluster.

- Phase d'agrégation des données : A cette étape, les données collectées auprès des différents membres nœuds est agrégé par le CH . Les membres du cluster transfèrent leurs informations au CH en utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) afin d'éviter la collision. Chaque nœud obtient son slot

pour communiquer l'information au CH. Dans l'étape d'agrégation des données du protocole CRSH.

## 2.7 Le routage dans les RCSF avec énergie renouvelable

### 2.7.1 Quelques algorithmes de routage dans ISEH

- **L'algorithme Harvest Sensitive Speed Selection (HASS)** : est proposé pour maximiser la réserve d'énergie des nœuds du réseau tout en répondant aux exigences de performances applicatives en WSN. HASS est une méthode basée sur l'ère pour le contrôle de l'énergie dans WSN en utilisant les performances limitées de la récupération d'énergie. Il utilise la mise à l'échelle dynamique de la tension technique pour économiser l'énergie de calcul en réduisant la tension et la fréquence de l'alimentation du processeur, et la technologie de mise à l'échelle utilisant la modulation dynamique pour économiser l'énergie de communication en réduisant le niveau de modulation radio. Le problème HASS est formulé comme un problème d'optimisation et résolu à l'aide d'algorithmes centralisés et distribués. En HASS, le niveau d'énergie  $C_i$  du nœud  $V_i$  à la fin d'une période est donné par l'équation suivante : est proposé pour maximiser la réserve d'énergie des nœuds du réseau tout en répondant aux exigences de performances applicatives en WSN. HASS est une méthode basée sur l'ère pour le contrôle de l'énergie dans WSN en utilisant les performances limitées de la récupération d'énergie. Il utilise la mise à l'échelle dynamique de la tension technique pour économiser l'énergie de calcul en réduisant la tension et la fréquence de l'alimentation du processeur, et la technologie de mise à l'échelle utilisant la modulation dynamique pour économiser l'énergie de communication en réduisant le niveau de modulation radio. Le problème HASS est formulé comme un problème d'optimisation et résolu à l'aide d'algorithmes centralisés et distribués. En HASS, le niveau d'énergie  $T_i$  du nœud  $V_i$  à la fin d'une période est donné par l'équation suivante : [37]

$$T_i = T_i^{int} + P_i * s - \left\lceil \frac{s}{\pi} \right\rceil * e_i^C \quad (2, 13)$$

Où :



$T^{int}$  : est le niveau d'énergie initial de Vi.

S : est la longueur de l'époque.

$\frac{s}{\pi}$  : sont des cadres d'une époque.

$e^C$  : est la consommation d'énergie.

Pi : est la puissance récoltée de l'époque.

Les résultats de la simulation montrent que les performances HASS sont significativement plus élevées que les approches de base.

- **Adaptive Framework for Energy Prediction (AFEPF)** : Ren et al ont conçu un système centralisé et distribué algorithmes pour le problème de couverture de cible sensible à la qualité dans un réseau de capteurs de récupération d'énergie. Une récupération d'énergie le plan devrait être parfait dans tout le réseau opérations. Cependant, une telle hypothèse est notée problématique dans les applications réalistes. Pour cette raison, les auteurs ont suggéré un cadre adaptatif pour les fluctuations de prédiction de l'énergie (AFEPF). Il vise à planifier le capteur activités par concept d'intervalle dynamique. L'AFEPF comprend de tranches de temps séquentielles n'excédant pas L. Il compte le nombre de créneaux à atteindre avant qu'une autre recharge ne se produise. La charge de l'énergie solaire dépend de la météo conditions, et la longueur de l'intervalle est planifiée de manière adaptative par la justesse de la focalisation de l'énergie. Ainsi, toute la période opérationnelle de L tranches de temps consiste en quelques intervalles. Ensuite, une suggestion d'heuristique gourmande est appliquée dans chaque intervalle. La précision du  $O_i(v)$  d'énergie prédit d'un le capteur v appartient  $V(I_i)$  dans un intervalle  $I_i$  est formulé : [34]

$$O_i(v) = \frac{|Qv - Q'v|}{Q'v} \quad (2, 14)$$

$Qv$  et  $Q'v$  : Représentent les valeurs réelles et prévues de l'énergie récoltée. L'exactitude de la prévision moyenne de nœud dans l'intervalle est désigné par l'énergie Figure 1.6 diagramme schématique du système ISEH de l'exactitude de prédiction de l'intervalle  $I_i$ . Il s'agit de l'exactitude moyenne des prévisions d'énergie dans les nœuds actifs dans l'intervalle donné par :

$$O_i = \sum_{v \in V(I_i)} \left[ \frac{O_i(v)}{V(I_i)} \right] \quad (2, 15)$$

Les résultats de la simulation expérimentale montrent que les solutions proposées sont prometteuses.

## **2.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons parler du routage dans les RCSFs, les protocoles de routage utilisés et leurs classifications. Nous terminerons avec les critères de conception des protocoles de routage dans ce type de réseau, aussi on a étudié le nouveaux protocoles de routage hétérogène dans les RCSF .

Le protocole

EH-LCHREP-HS(Energy Harvesting Layer  
and Cluster based Hierarchical Routing and  
Energy Optimization Protocol and  
Heterogeneous Sensor)

### **3.1 Introduction**

Après des années de recherche, la contrainte d'énergie reste un défi majeur dans les réseaux de capteurs hétérogènes sans fil, ce qui est due à la capacité limitée des capteurs et de leur batterie qui est difficile à recharger et même parfois impossible. Pour y remédier à cette contrainte, plusieurs approches sur le routage hiérarchique ont été proposées, cela consiste à repartitionner le réseau en groupes, où chaque groupe est géré par un chef de groupe (clusterhead). Ce dernier transmet les données collectées par l'ensemble des noeuds à la station de base . Dans ce chapitre nous commençons par une présentation générale de notre protocole puis nous présentons en détail les différentes étapes de sa conception.

## 3.2 Description de protocole

### 3.2.1 Motivation

Récemment, de nombreux protocoles de routage RCSF ont été proposés pour améliorer les performances du réseau. Ils peuvent être divisés en deux catégories : les protocoles en cluster et les protocoles en clair . Comme nous le savons tous les protocoles est proposé sur la base des RCSF homogènes, tandis que, dans les applications pratiques, l'hétérogénéité des nœuds ne peut être évitée. Il est nécessaire de proposer le protocole adapté aux HWSN. Les capteurs collectent les données en détectant leur cible, puis les données saisies sont envoyées à la station de base (BS). Les nœuds communiquent entre eux dans le réseau en utilisant les signaux radio à courte portée pour accomplir leurs tâches. Les méthodologies de routage sur les clusters sont également utilisées pour l'augmentation de la durée de vie du réseau. Le réseau dans ces approches est séparé en plusieurs clusters et un chef de cluster (CH) est affecté à chaque cluster. Les nœuds membres du cluster transfèrent leurs données détectées au CH. Les données consignées sont ensuite agrégées par le CH et à la BS . Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage hiérarchique appelée EH-LCHREP-HS (Energy Harvesting Layer and Cluster based Hierarchical Routing and Energ Optimization Protocol and Heterogeneous Sensor) qui est l'amélioration du protocole de routage LCHREP. Ce protocole vise à minimiser la consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs hétérogènes sans fil. Le LCHREP-HS utilise des clusters forment es sur une couche et utilise également le multi-hop entre ces différentes divans. Il permet également de réduire le nombre de nœuds défailants, et donc de garder plus de nœuds en vie après l'envoi des paquets et pour améliorer la long évité de réseau de capteurs sans fil, bases sur la récupération d'énergie.

### 3.2.2 Hypothèse

Le modèle RCSF hétérogène comprend deux cent nœuds de capteurs qui sont aléatoirement situés dans une région de détection de 500 X 500 mètres carrés.

Les hypothèses suivantes sont faites sur le modèle RCSF hétérogène et les détails du capteur sont aussi suit :

- Les nœuds capteurs sont hétérogène (Il existe trois catégories de nœuds. Tous les nœuds du même type ont les mêmes énergies).
- Tous les nœuds sont rechargeables.
- Les nœuds sont répartis aléatoirement dans la zone de capture et ils sont fixes.
- La station de base est considérée comme une ressource qui est non limité ni épuisable.
- La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie.
- Chaque capteur à un identifiant unique et la station de base connait tous les positions des capteurs.
- Les nœuds capteurs peuvent gérées leurs puissance d'émission.
- La station de base est capable d'envoyer des signaux unidirectionnels avec un angle  $\alpha$ .

### 3.2.3 principe de fonctionnement

Il est important de minimiser la dissipation d'énergie et de maximiser la durée de vie du réseau. Dans cette section, nous décrivons un protocole d'élection stable pour les RCSF hétérogènes , pour améliorer à la fois les contraintes d'énergie et de période stable.

Dans une architecture basée sur le clustering, nous avons trois types de nœuds normal, avancé et super, les nœuds capteurs sont divisés en plusieurs groupes appelés clusters. Chaque cluster a un chef connu sous le nom Cluster Head (CH). Tous les nœuds capteurs détectent les données locales et les envoient à leur CH correspondant. Les CH agrègent ensuite les données locales et les envoient analement à la station de base (BS) directement ou via d'autres CH.

- **Phase d'initialisation** : Dans cette phase on a utilisé l'architecture proposée dans [36] qui consiste à découper le réseau en couches pour assurer le routage multi-saut, puis partitionner ces niveaux en zones (Clusters), ou chaque niveau contient un nombre des zones dépend de numéro de niveau et le nombre de capteurs dans le niveau, notons que cette phase est exécutée une seule fois durant le processus de routage.

Le modèle hétérogène est utilisé pour mettre en œuvre le protocole proposé dans lequel les nœuds sont séparés en trois types en fonction de leurs énergies initiales. Les nœuds du schéma proposé sont classés comme nœuds normaux, avancés et super . Les nœuds avancés reçoivent une énergie supplémentaire par rapport aux nœuds normaux et Les nœuds super reçoivent une énergie supplémentaire par rapport aux nœuds avancés . Les énergies des nœuds sont données comme suit : où  $a$  et  $b$  représente les facteurs d'énergie supplémentaire affecté aux nœuds avancés et nœuds super ,  $E_0$  est l'énergie initiale et  $n$  représente le nombre total de nœuds.  $m_0$  pourcentage de  $m$  nœuds sont des super nœuds.  $(1 - m)$  représente les nœuds normaux restants dans le réseau.

L'énergie initiale des nœuds avancés est supérieure à celle des nœuds normaux et l'énergie initiale des super nœuds est supérieure à celle des nœuds avancés comme suit :

- L'énergie initiale de nœud Normaux =  $E_0$
- L'énergie initiale de nœud avancés =  $E_0(1 + \alpha)$
- L'énergie initiale de nœud super =  $E_0(1 + \beta)$
- l'énergie totale =  $nE_0(1 + (\alpha - m_0(\alpha - \beta)))$

- **Élection de Cluster Head** : Après avoir devisé le réseau en couches et zones, la station de base doit de mettre en place un temporaire cluster head TCH aléatoirement dans chaque cluster, son rôle est d'élire le CH. Après l'élection d'un CH le TCH devient un normal nœud capteur. Le TCH envoie un message d'élection à tous les membres de son cluster, ces derniers répondent avec un message contenant leurs énergies résiduelles et sa valeur de probabilité de sélection CH .

$$\rho_{normal} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))} \quad (3, 1)$$

$$\rho_{advanced} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m_0(\alpha - \beta))} * (1 + \alpha) \quad (3, 2)$$

$$\rho_{super} = \frac{P_{opt}}{1 + m(\alpha - m0(\alpha - \beta))} * (1 + \beta) \quad (3.3)$$

avec :

$$\rho_{opt} = \frac{k_{opt}}{N}$$

$k_{opt}$ =Le numéro d'optimal des cluster heads.

$N$ =Le numéro de nœud.

L'élection de CH aide a choisir le nœud le plus efficace en tant que CH, ce qui améliore la durée de vie du réseau. Les fonctions des nœuds est déroule comme suit : chaque nœud choisit un nombre de maniéré aléatoire entre 0 et 1. Si cette valeur est inférieure à un seuil  $T(n)$  le nœud devient cluster head. Le seuil est définit comme suit :

$$T(n_{norm}) = \begin{cases} p_{norm}/(1 - p_{norm}) * (rmod(1/p_{norm}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & si \quad n \in G \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (3,4)$$

$$T(n_{adv}) = \begin{cases} p_{adv}/(1 - p_{adv}) * (rmod(1/p_{adv}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & si \quad n \in G \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (3,5)$$

$$T(n_{sup}) = \begin{cases} p_{sup}/(1 - p_{sup}) * (rmod(1/p_{sup}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & si \quad n \in G \\ 0 & sinon \end{cases} \quad (3,6)$$

Le modèle de consommation d'énergie de chaque TCH dans l'élection est le suivant :

$$EFCH_i = EFCH_i - E_{constTCH} \quad (3,7)$$

Où :

$EFCH_i$  : est l'énergie résiduelle du FCH.

$E_{constTCH}$  : l'énergie consommée par le temporaire Cluster Head.

#### Déclaration :

Node : est le nœud capteur

NbrNod : nombre total des nœuds

L : le nombre de niveaux dans le réseau

$j, k$  : des variable d'entier IdNode , IdCH , IdtFCH , IdFCH : des variable entier qui défini le nombre d'identifiants des nœuds

$E_{max}$  ,  $E_{consom}$  ,  $E_{reseau}$  ,  $E_{consTCH}$  ,  $E_{node}$  : des variables réel sont définies les différents énergie de chaque type de nœuds

List[j] : tableau d'entier qui stocke le nombre de nœuds dans chaque case pour chaque niveau.

Tab[k] : tableau d'entier qui stocke le nombre de clusters dans chaque case pour chaque niveau.

SizeMsgReceve : variable réel qui définit la taille de message à recevoir.

dead : variable entier qui définit les nœuds qui sont morts.

Type="TCH", "CH", "N" : variable string pour le type des nœuds

tfCH : table des entiers qui stockent les temporaires Cluster Head

$\alpha$  : facteur d'énergie pour les nœuds avancés

$\beta$  : facteur d'énergie pour super

m : proposition de nœuds avancés

m0 : proposition de super nœuds parmi les nœuds avancés

r : Les Rondes

Popt : Optimal Probability for CH selection



Algorithme 1 : Algorithme d'élection de Cluster Head

**Debut**

1 : IdFCH=tfCH(k)

2 : Emax=0 ,IdCH=0

3 : Pour j allant de 1 à NbrNod faire

4 : IdNode = Tab[k,j]

5 : Si ( IdNode >0)and (List[IdNode-1].Type!= "TCH")and(List[IdNode-1].dead=0)

6 : EconsTCH = Eresevie \* SizeMsgReceved

7 : Si(List[IdtFCH-1].energie - EconsTCH > 0.01)

8 : List[IdtFCH-1].energie=List[IdtFCH-1].energie - EconsTCH

9 : Econsom = Econsom + EconsTCH

10 : Pour nœud normal

11 :  $T(n_{norm}) = \begin{cases} p_{norm}/(1 - p_{norm}) * (rmod(1/p_{norm}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

12 : Pour nœud avancé

13 :  $T(n_{adv}) = \begin{cases} p_{adv}/(1 - p_{adv}) * (rmod(1/p_{adv}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

14 : Pour nœud super

15 :  $T(n_{sup}) = \begin{cases} p_{sup}/(1 - p_{sup}) * (rmod(1/p_{sup}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

16 : Si(Enode > Emax)

17 : Emax=Enode

18 : IdCH=List[IdNode-1].id

19 : **Sinon**

20 : List[IdtFCH-1].Type="N"

21 : ChoixFCH()

22 : retourne

23 :Pour j allant de 0 à NbrNod faire

24 : IdNode=Tab[k,j]

25 : Si(IdNode >0)and (IdNode!=IdCH) and (List[IdNode-1].dead =0)

26 : List[Tab[k,j]-1].ItCH =IdCH

27 : List[Tab[k,j]-1].ItFCH =-1

28 : ch[List[IdCH-1].z , List[IdCH-1].cluster] = IdCH

29 :List[IdCH-1].Type="CH" ; tCH[K] = IdCH

30 :Fin

**Formation de cluster :** Un nœud détermine son cluster en choisissant le CH qui peut être atteint avec le moins de consommation d'énergie de communication. Une fois les cluster-head élus et les clusters formés, on passe à la phase de transmission.

— **Phase de routage des données :**

Le but de cette étape est d'envoyer les données agrégées de chaque capteur A la station de base. A ce stade, nous vous recommandons d'utiliser deux threads pour faire Actionner le capteur, le fonctionnement du fil consiste à diviser le processeur en deux threads.

- Le premier thread A dans l'étape de routage des données.
- Le deuxième fil B est utilisé pour charger l'énergie renouvelable à travers le capteur. L'algorithme de création de thread A démarre un thread responsable du routage. L'algorithme de ce fil s'exprime comme suit :

**Déclaration :**

Algorithme 2 : Algorithme de Thread A

**Debut**

1 : global Nodes //déclaré les nodes (capteurs) comme variable globale

2 : Routing=Route(Nodes)

3 : retourne

Dans l'algorithme de thread B, On a utilisé la formule suivante [18] l'algorithme choisi une variable aléatoire depuis la formule P(s), et il la considérer comme une valeur de chargement de noeud dans un temps t.

$$\rho(s) = \left| 0.9 * R(t) * \cos\left(\frac{t}{7 * \pi}\right) * \cos\left(\frac{t}{10 * \pi}\right) \right| \quad (3, 8)$$

**Ou :**

P(S) : proedcture source /temps, borne a une valeur maximale [0,0.9].

R(t) : les valeurs aléatoires entre 0 et 1(random).

**Déclaration :**

**EH** : liste des l'énergie renouvelable qui prend des variable aléatoire de a.

**E** : liste des l'énergie résiduelle de capture.

**a** : variable réel de prodecture source.

**arret** : variable booléen qui défini le mode de thread.

**Xmax, Ymax** : des valeurs réel constant.

Algorithm 3 :Algorithme de Thread B

arret = False

Eh , X = list()

Xmax = 500, Ymax = 0.00075

1 :Pour t=arange(1, Xmax, 0.1)

2 : a = abs (Ymax \* random() \* |0.9 \* R(t) \* cos( $\frac{t}{7*\pi}$ ) \* cos( $\frac{t}{10*\pi}$ )|

3 : Eh.append(a)

4 : X.append(t)

5 :cont=Eh.len()

6 :Pour Nodes=1 a NbrNod faire

7 : j = 0

8 : Tan que True :

9 : Si (arret)

10 : raise ValueError("arrêt demandé")

11 : Sinon

12 : Pour Nodes=1 a NbrNod faire

13 : ValEH =random.randrange(0, cont)

14 : E=Liste[i].energie + Eh[ValEH]

15 : Si(E > Einit)

16 : Liste[i].energie = Einit

17 : Sinon

18 : Liste[i].energie = E

19 :except

20 :ecrire("")

21 :ecrire("%s" % sys.exc\_info()[1])

— **La phase de routage :**

Il effectue 100 routes, stockant à chaque fois l'énergie totale du nœud, et le nœud morte :

**Déclaration :**

**TotalDead** : liste qui stocker les nœuds mort.

**TotalE** : liste qui stocker le total d'énergie des nœuds.

Algorithme 4 : Algorithme de routage

**Debut**

Tanque  $i < 100$  faire

1 : Routing(Nodes, clusterModel)

2 : TotalE.append(Econsomme)

3 : TotalDead(dead)

4 : Econsomme = 0

5 : dead = 0

6 :  $i = i + 1$

7 : time.sleep(0.1)

3 : Eh.append(a)

4 : X.append(t)

5 : cont=Eh.len()

6 : Pour Nodes=1 a NbrNod faire

7 :  $j = 0$

8 : Tan que True :

9 : **Si** (arret)

10 : raise ValueError("arrêt demandé")

11 : **Sinon**

12 : Pour Nodes=1 a NbrNod faire

13 : ValEH =random.randrange(0, cont)

14 :  $E = \text{Liste}[i].\text{energie} + \text{Eh}[\text{ValEH}]$

15 : **Si**( $E > \text{Einit}$ )

16 :  $\text{Liste}[i].\text{energie} = \text{Einit}$

17 : **Sinon**

18 :  $\text{Liste}[i].\text{energie} = E$

19 :except

1. **Transmission des données de capteur** Dans cette étape, chaque nœud capteur calcule son énergie, si elle est supérieure à 0, alors il calculera l'énergie qui sera consommée pour envoyer ces données agrégées. Veuillez noter que l'énergie de transmission dépend de la taille des données à agréger et de la distance entre le nœud et le CH. Après avoir testé si l'énergie calculée est supérieure à zéro, il envoie des données. Sinon, l'algorithme le traitera comme une impasse. Et modèle de consommation d'énergie Dans chaque nœud de capteur ES<sub>ni</sub> Dans cette transmission comme suit :

$$E_{node_j} = E_{node_j} - E_{consNode} \quad (3,)$$

Où :

$E_{node_j}$  : est l'énergie résiduelle dans le capteur j.

$E_{consNode}$  : L'énergie consommé par le capteur qui envoi les données.

**Déclaration** : ch : variable entier qui définis Cluster Head .

SB : est la station de base, dBs : distance à la station de base .

tCH : table d'entier qui stocker les temporaire Cluster Head.

Dmin : la distance minimale .

i, m , n , c : des variable d'entier .

TC(k) : variable pour stocker le nombre de clusters pour chaque niveau .

fch , clusterCH :des variable entier sont définis les type de cluster head .

ItCH : variable entier qui défini le nombre d'identifiant de nœuds temporaire CH .

d : la distance .

Eaggr : variable réel qui définies l'énergie d'agrégation de donnée .

NumCluster : numéro de cluster .

nbrNodeVivant : variable entier pour le nombre des nœuds vivant .

SizeMsgSend : variable réel qui défini la taille de message qui envoyée .

Algorithme 5 : Algorithme de transmission les données des capteur

**Debut**

1 :# transmesson data des noeud capteur

2 :Pour j allant de 1 à NbrNod faire

3 : Si ( list[j].Type!="CH")and (List[j].ItCH!= -1) and(List[IdNode-1].dead=0)

4 : d = sqrt((Liste[Liste[j].ItCH - 1].x - Liste[j].x) \*\* 2 + (Liste[Liste[j].ItCH - 1].y -Liste[j].y) \*\* 2)

5 : EconsNode = Etransfer \* d \*SizeMsgSend

6 : Si(Liste[j].energie - EconsNode > 0)

7 : Liste[j].energie = Liste[j].energie - EconsNode

8 : Econsomme = Econsomme + EconsNode

9 : **Sinon**

10 : Liste[j].dead = 1

11 : dead += 1

12 : DisAvecAutre(Nodes,Liste[j].NumCluster)

13 : Econsomme = Econsomme+Liste[j].energie

14 : Liste[j].energie = 0

15 :FIN

2. **Réception des données par le Cluster-Head** : Dans cette étape, l'algorithme traversera tous les chefs de cluster de réseau existants, puis testera si l'énergie est suffisante pour recevoir des messages de tous les nœuds actifs. Si l'énergie du cluster head est supérieure à 10 %, il recevra des données. Sinon il jouera le rôle de TCH et choisira un autre CH. Le modèle de consommation énergétique de chaque cluster head ECH  $i$  dans cette transmission est exprimé par la formule suivante :

```

Algorithmme 6 : Algorithme de réception de message par le Cluster Head
Debut
16 :#reception Cluster Head
17 :Pour k allant de 1 à TC faire
18 : IdCH = tch[k]
19 : Pour j allant de 0 à NbrNod
Chapitre 3 Le protocole EH-LCHREP
20 : IdNode=Tab[k, j]
21 : Si(IdNode > 0) and (IdNode!= IdCH) and (Liste[IdNode - 1].dead = 0)
22 : EconsCH = Ereceive*SizeMsgSend
23 : Si(Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH > 0.1)
24 : Liste[IdCH - 1].energie = Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH
25 : Econsomme = self.Econsomme + EconsCH
26 : Si non
27 : clusterCH=Liste[IdCH - 1].NumCluster
28 : tfch[clusterCH]=IdCH
29 : Liste[IdCH - 1].type ="TCH"
30 : Pour m allant de 1 a NbrNod
31 : IdNode=Tab[clusterCH, m]
32 : Si(IdNode> 0) and (IdNode!= IdCH) and (Liste[IdNode - 1].dead = 0)
33 : Liste[IdNode - 1].ItCH = -1
34 : Liste[IdNode - 1].ItFCH = IdCH
35 : ch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = -1
36 : fch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = IdCH
37 : NodSendE(Nodes,clusterCH)
38 : ElectCH(Nodes, clusterCH)
39 :Fin

```

3. **Agrégation des données** : Une fois que le cluster head a reçu les données, il agrège les données reçues de chaque nœud et les transmet au cluster head supérieur .

Algorithme 7 : Algorithme de d'agrégation

**Debut**

```

40 :# agrégation
41 :Pour k allant de 1 à TC faire
42 : nbrNodeVivant=0
43 : IdCH = tch[k]
44 : Pour j allant de 1 à NbrNod faire
45 : IdNode=Tab[k, j]
46 : Si(IdNode> 0 ) and(IdNode!= IdCH) and (Liste[IdNode - 1].dead = 0)
47 : nbrNodeVivant += 1
48 : EconsCH =Eaggr * nbrNodeVivant * SizeMsgReceved
49 : Si(Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH)> 0.1)
50 : Liste[IdCH - 1].energie = Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH
51 : Econsomme = self.Econsomme + EconsCH
52 : Sinon
53 : clusterCH =Liste[IdCH - 1].NumCluster
54 : tfch[clusterCH] = IdCH
55 : Liste[IdCH - 1].type = "TCH"
56 : Pour m allant de 0 à NbrNod
57 : IdNode = Tab[clusterCH, m]
58 : Si(IdNode> 0 ) and(IdNode!= IdCH) and (Liste[IdNode - 1].dead = 0)
59 : Liste[IdNode - 1].ItCH = -1
60 : Liste[IdNode - 1].ItFCH = IdCH
61 : ch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = -1
62 : fch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = IdCH
63 : NodSendE(Nodes,clusterCH)
64 : ElectCH(Nodes,clusterCH)
65 :Fin

```



4. **Transmission inter-Cluster** : Après avoir agrégé les données dans le CH, chaque CH envoie ses données au niveau adjacent suivant et proche du SB CH, et le CH de premier niveau achemine directement les données reçues vers le SB. SB attribue CH à chaque CH Il peut lui envoyer des données.

Algorithme 8 : Algorithme de transmission les données di CH à CH ou SB

**Debut**

```

66 :# transmesson de CH à CH ou BS
67 :Pour k allant de 1 à TC faire
68 : Dmin = 1000000; IdCH =tch[k]
69 : c =Liste[IdCH - 1].cluster; L = Liste[IdCH - 1].z
70 : Si(L!= 0)
71 : n = k[L - 1]
72 : Si(n!= 0)
73 : Pour h allant de 1 à n faire
74 : Si(ch[L - 1, h] != 0)
75 : xCHs = Liste[ch[L - 1, h] - 1].x; yCHs = Liste[ch[L - 1, h] - 1].y
76 : x = Liste[IdCH - 1].x; y = Liste[IdCH - 1].y
77 : d = sqrt((xCHs - x) ** 2 + (yCHs - y) ** 2)
78 : Si(d < Dmin)
79 : Dmin = d
80 : EconsCH = Ereceive * Dmin * SizeMsgReceved
81 : Si((Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH) > 0.1)
82 : Liste[IdCH - 1].energie = Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH
83 : Econsomme = self.Econsomme + EconsCH
84 : Sinon
85 : clusterCH=Liste[IdCH - 1].NumCluster
86 : tfch[clusterCH]=IdCH
87 : NodeListe[IdCH - 1].type ="TCH"
88 : Pour m allant de 1 à NbrNod faire
89 : IdNode = Tab[clusterCH, m]
90 : Si(IdNode> 0 )and(IdNode!= IdCH) and (Liste[IdNode - 1].dead = 0)
91 : NodeListe[idnode - 1].ItCH = -1

```

```

92 : Liste[idnode - 1].ItFCH = IdCH
93 : ch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = -1
94 : fch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = IdCH
95 : NodSendE(Nodes, clusterCH); ElectCH(Nodes, clusterCH) 96 : Sinon //
Envois à la station de base
97 : dBs =sqrt((x - Liste[IdCH - 1].x)**2 +(y - Liste[IdCH - 1].y)** 2)
98 : EconsCH = Etransfer * dBs * .SizeMsgReceved
99 : Si((Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH) > 0.1)
100 : Liste[IdCH - 1].energie = Liste[IdCH - 1].energie - EconsCH
101 : Econsomme = self.Econsomme + EconsCH
102 : Sinon
103 : clusterCH =Liste[IdCH - 1].NumCluster
104 : tfch[clusterCH] = IdCH ; Liste[IdCH - 1].type = "TCH"
105 : Pour m allant de 1 à NbrNod faire
106 : IdNode = Tab[clusterCH, m]
107 : Si(IdNode> 0 )and(IdNode!= IdCH) and (Liste[IdNode - 1].dead = 0)
108 : Liste[IdNode - 1].ItCH = -1 ; Liste[IdNode - 1].ItFCH = IdCH
109 : ch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = -1
110 : fch[Liste[IdCH - 1].z, Liste[IdCH - 1].cluster] = IdCH
111 : NodSendE(Nodes, clusterCH); ElectCH(Nodes, clusterCH)
112 :Fin

```

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre nouveau protocole de routage hiérarchique " EH-LCHREP-HS " selon l'approche de clustering statique pour les réseaux de capteurs hétérogènes sans fil.

Le protocole proposé vise à maximiser la conservation d'énergie et la prolongation de la durée de vie du réseau. L'idée de notre protocole est inspirée de deux autres protocoles : LEACH et CRSH, puis on les a introduit quelques améliorations pour obtenir une nouvelle solution meilleure en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau.

Pour évaluer les performances de notre proposition, nous présenterons dans le chapitre suivant, les résultats des simulations sous Python.

# Évaluation de performance

## 4.1 Introduction

La simulation est une technique de modélisation du monde réel. Elle consiste à modéliser un système en représentant toutes ses entités, leurs comportements et leurs interactions. Dans ce chapitre, Nous commencerons par une description du simulateur que nous avons utilisé, ensuite nous allons évalue les performances de réseaux de capteurs sans fil (EH- LCHREP-HS) que nous avons proposé.

## 4.2 Environnement de simulation

Nous avons effectué une série de simulations à l'aide du programme "python", puis nous analyserons et discuterons les résultats de la simulation.

### 4.2.1 Python :



Le langage de programmation Python a été créé en 1989 par Guido van Rossum des Pays-Bas. La première version publique de ce langage a été publiée en 1991. Ce langage de programmation possède de nombreuses fonctionnalités intéressantes : [39]

- Il est multi-plateforme. Autrement dit, il convient à de nombreux systèmes d'exploitation : Windows, Mac OS X, Linux, Android, iOS, du micro-ordinateur Raspberry Pi au superordinateur.
- libre. Vous pouvez l'installer sur autant d'ordinateurs que vous le souhaitez (même sur votre téléphone!). -C'est un langage de haut niveau. Il a relativement peu de compréhension du fonctionnement des ordinateurs À utiliser.
- C'est un langage explicatif. Contrairement aux scripts Python, il peut être exécuté sans compilation Des langages comme C ou C++.
- Il est orienté objet. En d'autres termes, les entités qui imitent des entités du monde réel peuvent être conçues en Python.
- Enfin, il est très utilisé en bioinformatique et plus généralement en analyse de données. Toutes ces caractéristiques font que Python est désormais enseigné dans de nombreuses formations, depuis l'enseignement secondaire jusqu'à l'enseignement supérieur.

### 4.2.2 Paramètres de simulation

Les nœuds capteurs utilisés dans la simulation sont hétérogènes : possédant la différent quantité d'énergie initiale, les différents capacités de calcul et mémoire. Ces capteurs sont combinés dans une zone carrée de  $500 * 500 m^2$ , qui contient 200 nœuds de capteurs déployés de manière aléatoire. Le tableau suivant résume les paramètres utilisés :

Paramètres de simulation	valeur
Nombre de stations de base	1.
Nombre des nœuds	200
Surface de simulation	$(500*500)m^2$
Location de Station de Base	(250, 500)
Portée de transmission	100 m
Nombre de paquet	100

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

### 4.2.3 Description du système

Notre système représente une zone de chalandise carrée d'une superficie de  $(500*500)m^2$ , avec 200 capteurs et un SB. Par conséquent, les entités de notre système sont :

- **SB** : Responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données réseau de.
- **Les CHs** : ils agrègent les données et ils participent au routage des paquets dans le réseau.
- **False FCH Clusters Heads** : ce sont des nœuds temporaires qui sont responsables de la sélection de CH dans chaque cluster. Une fois que CH est sélectionné, ils seront renvoyés par  $S_n$ .
- **Nœuds capteurs  $S_n$**  : ils sont utilisés pour détecter différents événements dans le réseau Zone et An participent au routage des données de la station de base.

#### 4.2.4 Variables suggestives du système

Les variables utilisées dans notre système sont illustrées dans le tableau suivant :

Définition de la variable	Nom de la variable	Valeur
Énergie initiale	initenergy	0.7 (Joule)
Énergie consommée lors de l'émission d'un paquet	transenergy	$5 * 10^{-6}$ (Joule)
Énergie de nœud restent après la transmission	ERest	Enode-Econs (Joule)
Énergie Consomme par les nœuds pour chaque transfère	Econsomme	transenergy * d *.SizeMsgSend (Joule)
Énergie consommée lors de l'agrégation des données	aggenergy	$5 * 10^{-7}$ (Joule)
Énergie consommée lors de la réception d'un paquet	recenergy	$5 * 10^{-6}$ (Joule)
Distance entre deux capteurs	DisAvecAutre	$\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$ ( Mètre)
Position d'un capteur	(x,y)	(x,y) ( Mètre)
La source énergie	P(S)	$\rho(s) =  0.9 * R(t) * \cos(\frac{t}{7*\pi}) * \cos(\frac{t}{10*\pi}) $ (Joule)
les valeurs aléatoires	R(t)	[0.1] ( Mètre)
facteur d'énergie pour les nœuds avancés	$\alpha$	1.0( Réel)
facteur d'énergie pour super	$\beta$	1.2 ( Réel)
proposition de nœuds avancés	m	0.2 ( Réel)
proposition de super nœuds parmi les nœuds avancés	m0	0.5 ( Réel)

TABLE 4.2 – Variables suggestives du système

### 4.3 Évaluation des performances

Dans ce qui suit, nous montrerons et analyserons les résultats de la simulation. Le résultat de chaque scénario est d'effectuer une simulation indépendante.

#### 4.3.1 Distribution des nœuds et la sélection des Clusters Head et les Faux Clusters Head

La figure (4.1) représente le déploiement aléatoire des nœuds et FCH, CH dans le bassin versant, et ce dernier est divisé en couches (niveaux de L1 à L5) et en clusters. Ces nœuds sont divisés en trois types (Les nœuds normaux, Les nœuds avancé, nœuds super).

Chaque type de symbole symbolise les types des nœuds, et chaque couleur symbolise les nœuds de la même zone (cluster), CH représente par un petit carré, FCH par un signe plus et le demi-cercle blue représente la station de base.

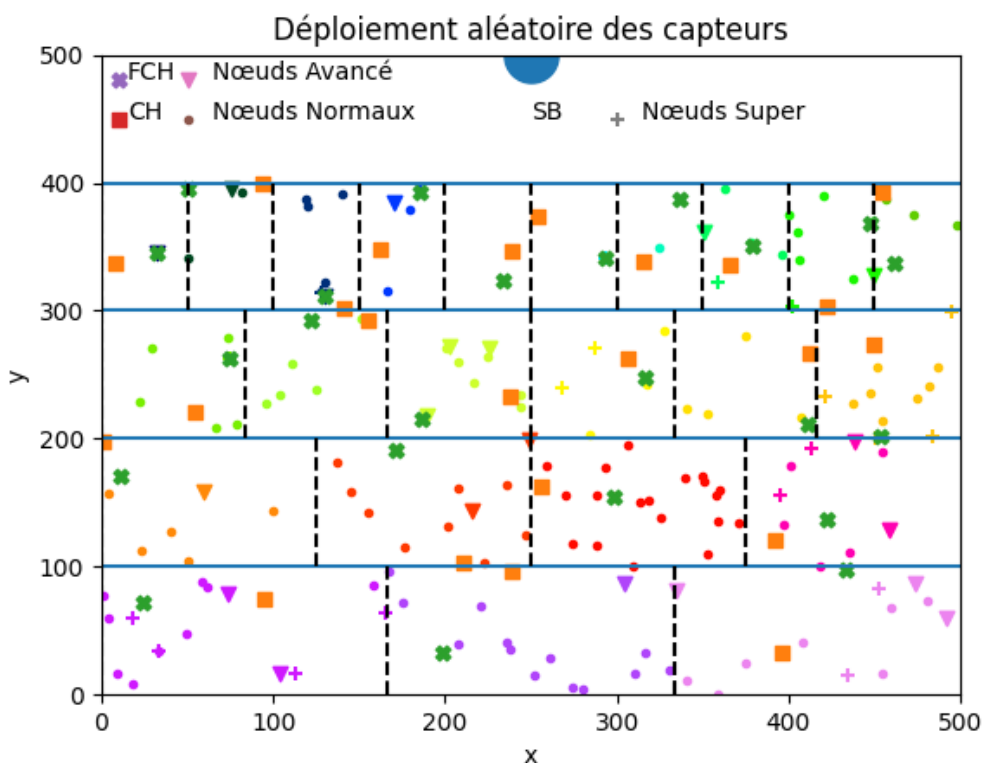


FIGURE 4.1 – Distribution des nœuds et la sélection des CHs et les FCHs.

### 4.3.2 Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets

La figure 4.2 ci-dessous montre la puissance consommée par notre protocole pour envoyer des paquets de données. On peut voir qu'à mesure que la quantité de transmission de paquets de données augmente, la consommation d'énergie du protocole augmente également proportionnellement .

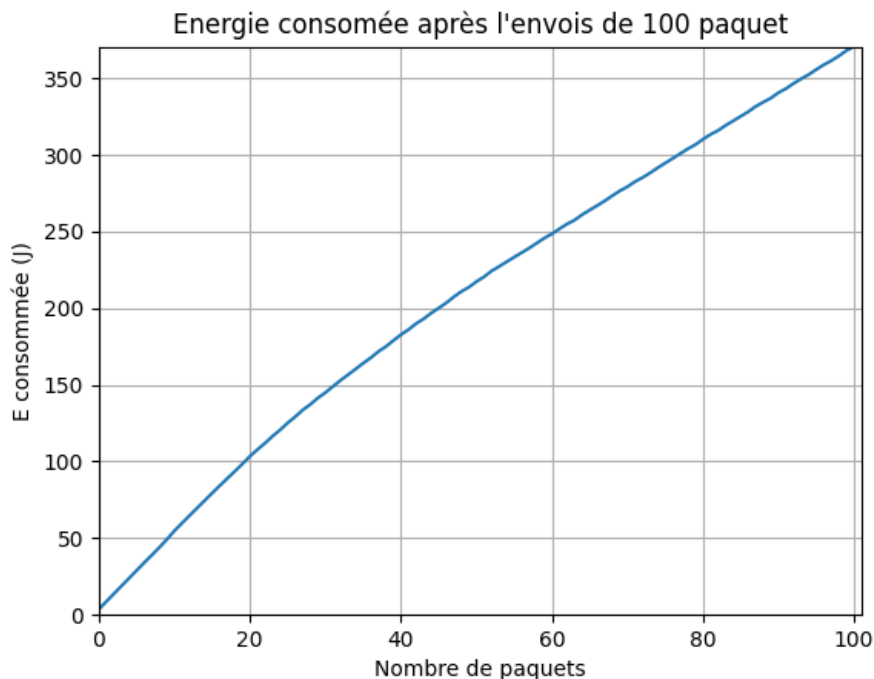


FIGURE 4.2 – Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets (EH-LCHREP-HS).

Nous avons comparé nos résultats avec le protocole CRSH et nous avons remarqué que le nombre de paquets que notre protocole peut envoyer est supérieur au nombre de paquets que le protocole CRSH peut envoyer.

Par exemple, lorsque la consommation électrique est de 100, notre protocole (EH-LCHREP-HS) a envoyé 20 paquets, tandis que l'autre protocole n'en a envoyé 16.



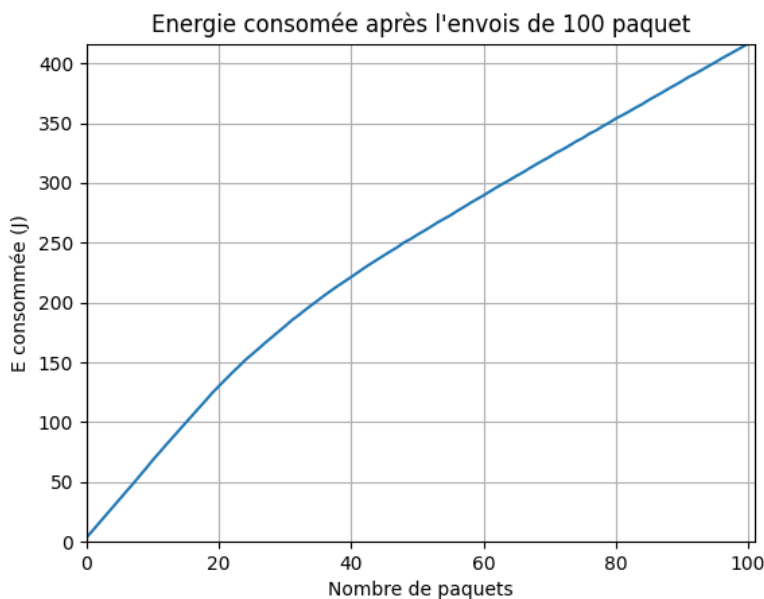


FIGURE 4.3 – Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets (CRSH).

Notre protocole (EH-LCHREP-HS) peut envoyer moins de paquets de données sans énergie renouvelable. Si ce dernier n'envoie que 80 paquets de données, alors son nœud échouera car l'énergie est épuisée.

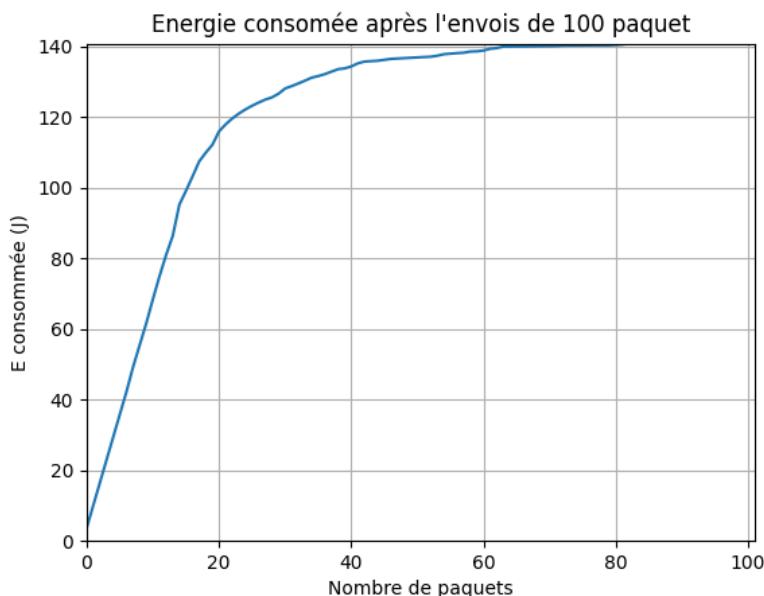


FIGURE 4.4 – Énergie consommée après l'envoi de 100 paquets (EH-LCHREP-HS) sans énergie renouvelable.

### 4.3.3 Nombre de nœuds mort en termes de paquets envoyés

Lors de l'étape d'élections de Cluster Head de notre protocole (EH-LCHREP-HS). La fonction de seuil du nœud normal, nœud avancés et nœud super est donnée par :

$$T(n_{norm}) = \begin{cases} p_{norm}/(1 - p_{norm}) * (rmod(1/p_{norm}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4,1)$$

$$T(n_{adva}) = \begin{cases} p_{adva}/(1 - p_{adva}) * (rmod(1/p_{adva}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4,2)$$

$$T(n_{sup}) = \begin{cases} p_{sup}/(1 - p_{sup}) * (rmod(1/p_{sup}))/ (E_{initial}/E_{residual}) & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4,3)$$

les résultats obtenus sont présentés dans la figure 4.6 ci-dessous.

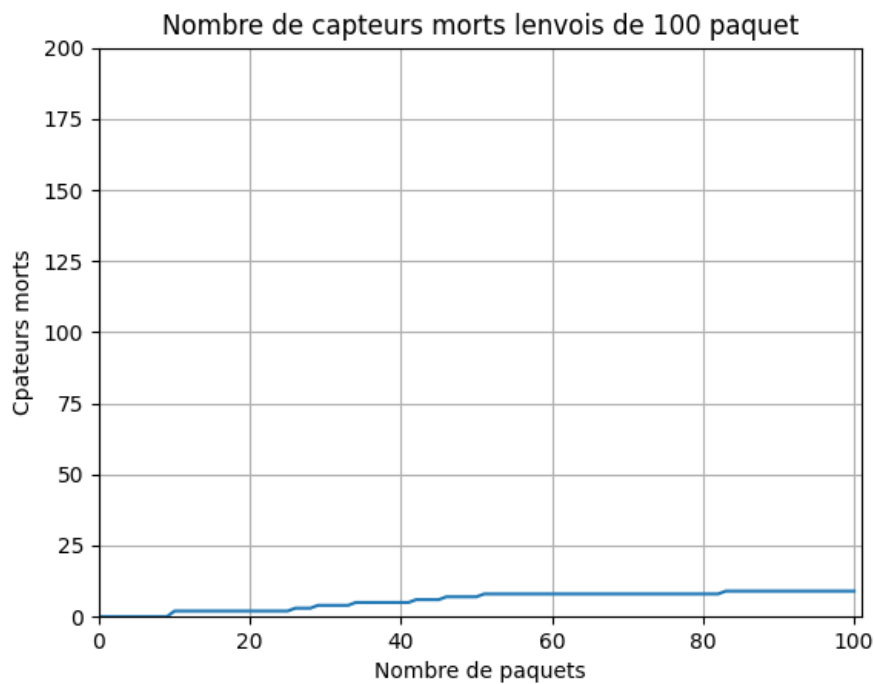


FIGURE 4.5 – Nombre de nœuds mort en termes de paquets envoyés (EH-LCHREP-HS).

La comparaison entre notre protocole EH-LCHREP-HS et le protocole CRSH montre que le nombre de nœuds morts dépendant de l'utilisation de CRSH pour envoyer des paquets de données est supérieur au nombre provoqué par notre protocoles. Nous avons remarqué que le nombre de nœuds morts a augmenté lors de l'envoi de paquets de données, les 100 paquets sont envoyées avec la morte de 9 nœuds .

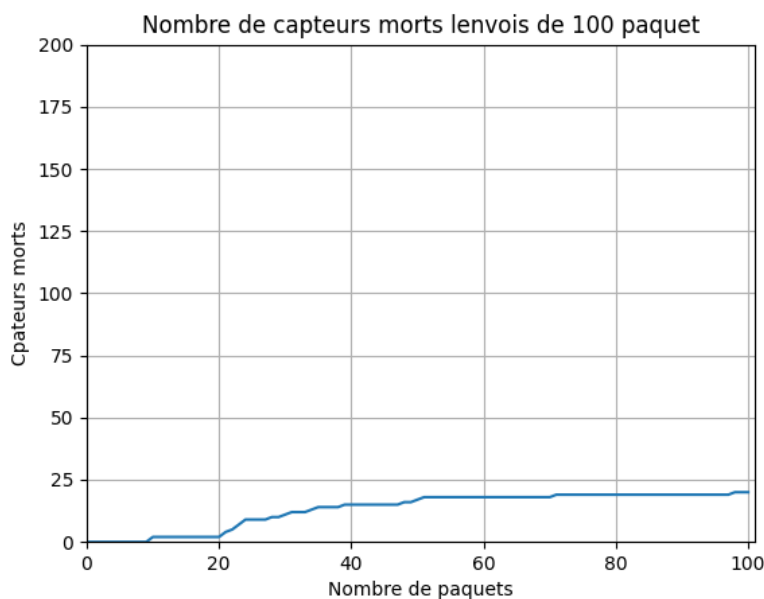


FIGURE 4.6 – Nombre de nœuds mort en termes de paquets envoyés (CRSH) .

Ainsi nous pouvons dire que notre protocole est performant et efficace comparative-ment au protocole CRSH de point de vue durée de vie et la consommation d'énergie.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs ensuite l'environnement de simulation de notre protocole , et enfin nous avons présenté les résultats de simulation. Les résultats de simulation obtenus montrent que notre protocole permet d'étendre la durée de vie du réseau comparativement au protocole CRSH.

# Conclusion générale et perspectives

Dans notre travail, nous sommes intéressés à la problématique de la conservation de l'énergie dans un réseau de capteurs sans fil. Dans ce dernier, les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries à faible capacité, généralement irremplaçables car les nœuds capteurs sont déployés dans des zones difficilement accessibles. Afin de prolonger la durée de vie du réseau de capteurs en minimisant la consommation d'énergie, plusieurs solutions ont été proposées. La majorité de ces solutions essaient d'éviter les différentes causes de perte d'énergie. Généralement, ces solutions ne sont pas suffisamment optimales ce qui laisse l'énergie dans un réseau de capteur un problème de recherche ouvert.

Nous avons proposé un nouveau protocole de routage en couches EH-LCHREP-HS (EnergyHarvesting Layer and Cluster based Hierarchical Routing and Energy Optimization Protocol and Heterogeneous Sensor) pour minimiser la consommation d'énergie dans le réseau. Son idée de base est le routage multi-sauts dans la communication inter-clusters, et il utilise également des clusters formés sur un réseau hiérarchique. Et en élisant le cluster head, il utilise la distance moyenne, ce qui permet de minimiser la perte d'énergie dans la communication au sein du cluster. Notez que ce protocole doit être conscient des changements physiques dans l'environnement. Par exemple, la lumière du soleil change toujours de manière irrégulière pendant la journée pour minimiser la luminosité du soleil, donc la récupération d'énergie sera très faible. L'évaluation des performances de notre protocole est simulée en python, et nous constatons que notre proposition est bien meilleure que le protocole CRSH.

# Bibliographie

- [1] Sara messai.gestion de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil”. *Thèse de doctorat en Informatique, L’Université Ferhat Abbas Sétif 1 et L’Université Claude Bernard Lyon 1*, 24/11/2019.
- [2] Stefano basagni, m.yousof naderi, chiara petrioli,and doraspenza.” wireless sensor networks withenergy harvesting”. *Electrical and Computer Engineering Department, Northeastern University, Boston,MA, U.S.A,Dipartimento di Informatica, Universit’a di Roma /La Sapienza”* ,Roma, Italy.
- [3] Kaissari soufiane.”conception d’un réseau de capteurs sans fil”. *Master en Génie électrique, Université Mohammed V École normale supérieure d’enseignement technique*, 6 juillet 2015.
- [4] Mehdi bouallegue.” protocoles de communication et optimisation de l’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”. *Thèse de doctorat en Télécommunications, Université du Maine*, 31/03/2016.
- [5] Yaser yousef.”routage pour la gestion de l’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”. *Thèse de doctorat , Computer Science. Université de Haute Alsace - Mulhouse*, 2010.
- [6] Muhammad omer farooq and thomas kunz.operating systems for wireless sensor networks : A survey. *In Sensors Journal, vol.11, pp. 5900-5930*, 2011.
- [7] Li, yin, and ronghua shi. ”an intelligent solar energy-harvesting system for wireless sensor networks.”. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015.
- [8] Ibrahima diane.”optimisation de la consommation d’énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs”. *Thèse de Doctorat en*

- Informatique, l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) Cotutelle internationale avec l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 17/07/2014.*
- [9] J. al-karaki and a-e. kamal."problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". *Université d'Oran*, 13 / 07 / 2010.
- [10] Kechar bouabdellah ."routing techniques in wireless sensor networks : A survey". *Thèse de Doctorat en Informatique, Vol.11, pp.6-28, 2004.*
- [11] Yacinechallal."réseaux de capteurs sans fils". *Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale : [http ://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/fr/](http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/fr/)*, 17/11/2008.
- [12] Delye, v. gauthier, m. marot, and m. beckeretat de l'art sur les réseaux de capteurs. rapport de recherche int n-05001rst get-int, umr5157 samovar. *Institut National des Télécommunications, Evry, France, 2005.*
- [13] Mme sari mounya amal."etude du rssi pour l'estimation de la distance dans les réseaux de capteurs sans fil". *Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen*, 12 Juin 2017.
- [14] Kaddouri ahlem et boudaoud chahrazed."routage géographique multi-chemins dans les réseaux de capteurs sans fil". *Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen*, 22 Juin 2016.
- [15] S. sentilles ." architecture logicielle pour capteurs sans fils en réseau". *rapport de recherche, Université de Pau et des pays de l'Adour*, juin 2006.
- [16] W. heinzelman, a. chandrakasan, and h. balakrishnan." energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks". *In the Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii*, January 2000.
- [17] Abbas, akli, et al." a real-time feedback scheduler for environmental energy with discrete voltage/frequency modes". *Computer Standards & Interfaces 44 (2016) : 264-273.*
- [18] Sudarshan t v.manjesh b n." a survey on heterogeneous wireless sensor networks". *Department of Computer Science and Engg. Akshaya Institute of Technology Tumkur, India*, April-2015.
- [19] Cédric ramassamy."analyse des protocoles des réseaux de capteurs sans fil". *DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DES ANTILLES ET DE LA GUYANE*, 2012.

- [20] Smaala aziz.”analyse analytique des protocoles multicast géographique dans les réseaux de capteurs : Etude comparative de deux protocoles”. *Master en Informatique, Université Larbi Ben M’hidi – Oum El Bouaghi Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie*, 13/06/2018.
- [21] Mr sahraoui belkheyr .”etude d’un protocole de routage basé sur les colonies de fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil”. *Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, Faculté des Sciences, Département d’Informatique*, 2013.
- [22] Abdesselam abdelhalim. belouatek mohammed.”conception d’un algorithme de routage basé sur l’heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle”. *Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen*, 2012-2013.
- [23] Jamal n. al-karaki ahmed e. kamal.”routing techniques in wireless sensor networks : A survey”. *Dept. of Electrical and Computer Engineering Iowa State University , Ames, Iowa 50011*, January 2005.
- [24] M elle amokrane fatma .”routage avec optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”. *Master en Informatique, Université Abderrahmane Mira De Bejaïa, Faculté des Sciences, Département d’Informatique*, Juin 2016.
- [25] Mlle saidani sabrina.mlle soualmi siha.”routage à basse consommation énergétique dans les réseaux de capteur sans fil à base de l’algorithme de dijkstra”. *Mémoire de Master Recherche En Informatique, Université A/Mira de Béjaïa*, 2014.
- [26] M. boudaa okba.”conception et réalisation d’un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil”. *Mémoire de Master En Informatique, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa*.
- [27] Khelifa said.”l’énergie dans les reseaux ad hoc”. *MÉMOIRE DE MAGISTER EN INFORMATIQUE, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran - Mohamed Boudiaf Faculté des Sciences*, 2010 - 2011.
- [28] Hadjer messabih.”sn-cas : Contribution des réseaux de capteurs à la conscience des contextes des systèmes”. *Mémoire Magister en Informatique, Université HADJ LAKHDAR – BATNA, Faculté des sciences, Département d’Informatique*.
- [29] Diery ngom.”optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau”. *Thèse de Doctorat en Informa-*

- 
- tique, l'Université de Haute Alsace (France) et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 17 Mai 2016.
- [30] Lyes khelladi & nadjib badache. "les réseaux de capteurs : état de l'art". *Rapport de recherche en informatique LSI-Département Informatique, Faculté Génie Electrique & Informatique, USTHB El Alia BP n 32, Bab Ezzouar, Alger, Algérie*, Février 2004.
- [31] Kay romer and friedemann mattern. "the design space of wireless sensor networks". *Institute for Pervasive Computing ETH Zurich*, January 2005.
- [32] Allouache djedjiga & azamoum karima. "optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". *Master en Informatique, Université A.MIRA-BEJAIA, Faculté des Sciences Exactes, Département Informatique*, 25 Juin 2014.
- [33] Bourebia nour el houda .bousnindja hesna ."les protocoles de routage hiérarchiques dans les réseaux de capteurs sans fil , etude de cas : Leach et ses variants". *Master en Informatique, Université de JIJEL*, 2018-2019.
- [34] Yaye m. sarr. "réduction des clusters singletons dans le protocole leach pour les réseaux de capteurs sans fil". *Université de Thiès, Bamba Guèye, Université Cheikh Anta Diop et Cheikh Sarr, Université de Thiès*.
- [35] Guangjie han, xu jiang, aihua qian, joel j. p. c. rodrigues, and long cheng ."a comparative study of routing protocols of heterogeneous wireless sensor networks". *Department of Information & Communication Systems, Hohai University, Changzhou 213022, China*, 2014.
- [36] Piyush rawat . siddhartha chauhan ."a novel cluster head selection and data aggregation protocol for heterogeneous wireless sensor network". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 9 August 2021.
- [37] Anisi, mohammad hossein, et al. "energy harvesting and battery power based routing in wireless sensor networks". *Wireless Networks*, 23.1 (2017) : 249-266.
- [38] Abbas, a., amad, m., amokrane, f. (2020). lchrep : Layer and cluster based hierarchical routing and energy optimization protocol in wireless sensor networks. *Journal of Digital Information Management*, 18(4), 139.
- [39] Patrick fuchs et pierre poulain. "cours de python, introduction à la programmation python pour la biologie". *Université de Paris, France*, version du 2 septembre 2021.



# Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont constitués d'un grand nombre de nœuds de capteurs qui sont généralement alimentés par batterie et conçu pour fonctionner pendant une grande période. Les domaines d'application sont nombreux et variés, tel que le domaine environnementale, médicale et militaire. L'atout majeur de ce dispositif est un déploiement à grande échelle sans aucune maintenance. Les capteurs n'ont pas besoin d'une infrastructure établie pour parvenir à transmettre des données vitales à l'étude de l'environnement. Il est nécessaire également de garantir une bonne qualité de service, car les réseaux de capteurs sans fils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, La source d'énergie pour alimenter les nœuds capteurs est fournie par des batteries ceux-ci peuvent être rechargeable ou non rechargeable. De nos jours, l'énergie renouvelable offre des avantages pour les RCSF, qui sont capables de prolongées la durée de vie, mais ce n'est pas suffisant car les conditions environnementales sont changeables. C'est pourquoi, il est nécessaire d'optimiser la consommation d'énergie à tous les niveaux de conception de ce type de réseau. Par conséquent, la minimisation de la consommation d'énergie est un facteur de conception des plus importants dans les réseaux de capteurs.

Le but de cette thèse est étudier les différents techniques de routages existant dans un contexte sans fil multi-saut afin d'obtenir de meilleures performances. Nous portons notre étude sur les protocoles de routages les plus connus afin de proposer dans une deuxième partie un nouveau protocole de routage permettant d'optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, en gardant une qualité de service optimales.

**Mots clés** : RCSF, Protocole de Routage hiérarchique, Consommation d'énergie...

# Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) are made up of a large number of sensor nodes that are typically battery powered and designed to operate for a long time. The fields of application are many and varied, such as the environmental, medical and military fields. The major advantage of this device is its large-scale deployment without any maintenance. Sensors do

not need an established infrastructure to successfully transmit data vital to the study of the environment. It is also necessary to ensure a good quality of service, as wireless sensor networks must incorporate mechanisms that allow users to extend the life of the entire network, The energy source to power the sensor nodes is provided by batteries these can be rechargeable or non-rechargeable. Nowadays, renewable energy offers advantages for SCNS, which are capable of prolonging the lifespan, but this is not enough because the environmental conditions are changeable. Therefore, it is necessary to optimize energy consumption at all design levels of this type of network. Therefore, minimizing energy consumption is a most important design factor in sensor networks.

The aim of this thesis is to study the different routing techniques existing in a multi-hop wireless context in order to obtain better performance. We are focusing our study on the most well-known routing protocols in order to propose in a second part a new routing protocol to optimize energy consumption in wireless sensor networks, while maintaining optimal quality of service.

**Key words :** WSN, Hierarchical Routing Protocol, Power Consumption,...