

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Mathématiques et Informatique



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en informatique

Option : Systèmes Intelligents

Thème

Une nouvelle approche pour la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Préparé par
CHEKHAR / Charifa

Membres du jury :

Pr. OMARI Mohammed	Président
Dr. KADDI Mohammed	Encadreur
M. DEMRI Mohammed	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) composé généralement des petits dispositifs intelligents appelés capteurs sans fil, capables de surveiller, collecter et transférer des informations. Le routage des données et l'énergie consommée par les nœuds sont l'une des principaux problèmes dans le RCSF, il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau. Le but de ce mémoire est de proposer une nouvelle approche pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Pour cela, nous proposons un nouveau protocole nommé MOD_HEED (Modified Hybrid Energy Efficient Distributed). Notre protocole vise à réduire la consommation d'énergie lors de la transmission des données à la station de base (SB). Le protocole MOD_HEED proposé basé sur une architecture hiérarchique en combinant les deux structures hiérarchiques : une structure hiérarchique en clusters et une structure hiérarchique en chaîne. La stratégie d'élection des clusters head (CH) basé principalement sur l'énergie résiduelle et la stratégie de construction de la chaîne reliant tous les CHs afin d'augmenter l'efficacité énergétique du réseau. Nous suggérons deux approches de ce protocole selon le critère d'acheminer les données à la SB. Dans la première approche, chaque CH envoie ses données et les données de ses membres à la SB. Dans la deuxième approche, les CHs transmettent les données en formant d'une chaîne de relais à relais jusqu'à la SB. Les résultats de la simulation obtenus montrent que notre deuxième approche minimise la consommation d'énergie des nœuds de capteurs et prolonge la durée de vie globale de réseau et elle est plus performante que la première approche.

Mots-clés : RCSF, routage, consommation d'énergie, SB, MOD_HEED, CH, durée de vie.

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) generally consist of small smart devices called wireless sensors, capable of monitoring, collecting and transferring information. Data routing and energy consumed by the nodes is one of the main issues in the WSN, so it is necessary to have an effective strategy that takes into consideration the network energy. The purpose of this thesis is to propose a new approach to minimize energy consumption in wireless sensor networks. For this, we propose a new protocol named MOD_HEED (Modified Hybrid Energy Efficient Distributed). Our protocol aims to reduce power consumption when transmitting data to the base station. The proposed MOD_HEED protocol based on a hierarchical architecture by combining the two hierarchical structures: a hierarchical cluster structure and a hierarchical chain structure. The cluster head (CH) election strategy based mainly on the residual energy and the strategy of building the chain connecting all the CHs in order to increase the energy efficiency of the network. We suggest two approaches to this protocol, depending on the criterion of routing the data to the base station. In the first approach, each CH sends its data and the data of its members to the base station. In the second approach, the CHs transmit data by forming a relay-to-relay chain back to the Base Station. The simulation results obtained show that our second approach minimizes the energy consumption of sensor nodes and prolongs the overall lifetime of the network and it performs better than the first approach.

Keywords: WSN, routing, power consumption, base station, MOD_HEED, CH, lifetime.

Remerciement

*Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant, notre Créateur, de nous avoir donné la force,
la volonté et surtout le courage d'accomplir ce travail.*

*Je tiens à remercier mon superviseur, Dr. Kaddi Mohammed, pour m'avoir encadré, guidé,
aidé et conseillé.*

*Enfin, je remercie mes chers parents, ma sœur et mes amis qui ont toujours été à mes côtés
pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail,
pour leur lecture attentive de ce mémoire et pour toutes leurs remarques.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A : Mes très chers parents, pour leur soutien durant toutes mes études, je ne saurais exprimer ma gratitude seulement par des mots. Que Dieu vous protège et vous garde pour nous.

A celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi chère maman, toutes mes joies, mon amour et ma reconnaissance,

A mon père, mon soutien, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir,

A ma précieuse sœur Hanane, les mots ne peuvent résumer ma reconnaissance et mon amour,

A mon cher ami, qui a toujours été à mes côtés,

A tous mes amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur,

A toute ma famille.

CHEKHAR Charifa

TABLE DES MATIERES

Table des matières :

Résumé.....	I
Remerciement.....	III
Dédicace.....	IV
Table des matière.....	V
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1	3
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 CAPTEUR.....	4
1.2.1 Définition d'un capteur.....	4
1.2.2 Les types de capteurs :.....	5
1.2.3 Capteur sans fil.....	6
1.2.4 Les composants de capteur.....	7
1.2.4.1 Architecteur matérielle d'un capteur.....	7
1.2.4.2 Architecteur logiciel (Systèmes d'exploitation):	8
1.3 RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL (RCSF)	11
1.3.1 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF)	11
1.3.2 Les caractéristiques de RCSF.....	11
1.4 ARCHITECTEUR PROTOCOLAIRE.....	12
1.4.1 Les Couches de la pile protocolaire [6]	12
1.5 FACTEUR DE CONCEPTION [5]	13
1.6 CLASSIFICATION DE RCSF [5]	15
1.7 DEFIS DE RCSF [4].....	16
1.8 DOMAINES D'APPLICATION.....	17
1.8.1 Applications militaires.....	18
1.8.2 Applications médicales	18
1.8.3 Applications commerciales.....	18
1.8.4 Application environnementale	19
1.8.5 Application à la surveillance.....	19

TABLE DES MATIERES

1.9	CONCLUSION.....	19
CHAPITRE 2	20
2.1.	INTRODUCTION	21
2.2.	NOTION DE DUREE DE VIE D'UN RESEAU.....	21
2.3.	CONSOMMATION D'ENERGIE DANS LES RCSF.....	22
2.3.1.	Niveau capture.....	22
2.3.2.	Niveau de communication.....	22
2.3.3.	Niveau traitement de données.....	23
2.4.	FACTEURS INTERVENANTS DANS LA CONSOMMATION D'ENERGIE	23
2.4.1.	État du module radio	23
2.4.2.	Accès au medium de transmission (MAC).....	23
2.4.3.	Modèle de propagation radio	25
2.5.	SOURCES DE LA SURCONSOMMATION D'ENERGIE.....	25
2.6.	CONSERVATION D'ENERGIE	26
2.6.1.	Techniques du Duty-cycling	26
2.6.2.	Techniques orientées données	27
2.6.3.	Techniques de Mobilité.....	27
2.7.	TECHNIQUE DE MINIMISATION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE.....	28
2.8.	CONCLUSION	30
CHAPITRE 3	31
3.1	INTRODUCTION	32
3.2	ROUTAGES DANS LES RCSF.....	32
3.3	ROUTAGE.....	32
3.4	PROTOCOLE DE ROUTAGE.....	33
3.5	CLASSIFICATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE	33
3.5.1	Classification selon la structure du réseau	33
3.6	TRAVAUX LIÉS	40
3.6.1	Algorithme de Routage Hiérarchique MHEED à Plusieurs Sauts (Multi-hop HEED) [37]	41
3.6.2	A Novel HEED Protocol for Wireless Sensor Networks [38].....	42
3.6.3	UHEED An Unequal Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks [39]... 43	
3.6.4	Congestion Control in Wireless Sensor Network using HEED Protocol [40]..... 45	
3.6.5	A novel clustering protocol ER-HEED [41]	47

TABLE DES MATIERES

3.6.6	<i>Comparaison entre les travaux liés</i>	48
3.7	<i>CONCLUSION</i>	51
CHAPITRE 4	52
4.1.	<i>INTRODUCTION</i>	53
4.2.	<i>OUTILS DE DEVELOPPEMENT</i>	53
4.3.	<i>SOLUTION PROPOSEE</i>	54
4.3.1.	<i>Modèle de réseau</i>	54
4.3.2.	<i>Modèle d'énergie</i>	54
4.3.3.	<i>Les hypothèses</i>	55
4.3.4.	<i>Description de la solution proposée</i>	56
4.4.	<i>SIMULATION</i>	62
4.4.1.	<i>L'interface de simulation</i>	62
4.4.2.	<i>Métriques de simulation</i>	65
4.5.	<i>RESULTATS & ANALYSE</i>	66
4.5.1.	<i>Résultats</i>	66
4.5.2.	<i>Analyse des résultats</i>	68
4.6.	<i>CONCLUSION</i>	69
	<i>Conclusion générale</i>	70
	<i>Références</i>	72

Liste des figures

Liste des figures

FIGURE 1. 1: SCHEMA D'UN CAPTEUR [18].	4
FIGURE 1. 2: QUELQUES EXEMPLES DE CAPTEURS.	5
FIGURE 1. 3: ARCHITECTURE D'UN NŒUD DE CAPTEUR.....	7
FIGURE 1. 4: ARCHITECTURE D'UN RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL (RCSF).	11
FIGURE 1. 5: LA PILE PROTOCOLAIRE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS.....	12
FIGURE 1. 6: L'UTILISATION DES RCSF DANS LE SERVICE MILITAIRE.....	18
FIGURE 1. 7: DOMAINES D'APPLICATION DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS.....	19
FIGURE 2. 1: LA SURECOUTE DANS UNE TRANSMISSION.	24
FIGURE 2. 2 : LES TECHNIQUES UTILISEES POUR MINIMISER LA CONSOMMATION D'ENERGIE.	29
FIGURE 3. 1: PRINCIPAUX PROTOCOLES DE ROUTAGES DANS LES RCSF.	33
FIGURE 3. 2: TOPOLOGIE PLATE.	34
FIGURE 3. 3: TOPOLOGIE HIERARCHIQUE.....	35
FIGURE 3. 4: LES APPROCHES DANS LE PROTOCOLE DE ROUTAGE HIERARCHIQUE.....	36
FIGURE 3. 5: ARCHITECTURE DU ROUTAGE HIERARCHIQUE HEED.	38
FIGURE 3. 6: TOPOLOGIE BASE SUR LA LOCALISATION.	39
FIGURE 4. 1: LE MODELE DE L'ENERGIE UTILISE.....	55
FIGURE 4. 2: ORGANIGRAMME DE LA PHASE INITIALE.....	57
FIGURE 4. 3: ORGANIGRAMME DE LA PHASE DE CONSTRUCTION.....	58
FIGURE 4. 4: ORGANIGRAMME DE PHASE INTRA-CLUSTER COMMUNICATION.....	60
FIGURE 4. 5: ORGANIGRAMME DE PHASE INTER-CLUSTER COMMUNICATION (MOD_HEED_WR).....	60
FIGURE 4. 6: ORGANIGRAMME DE PHASE INTER-CLUSTER COMMUNICATION (MOD_HEED_R).....	62
FIGURE 4. 7: L'INTERFACE DE SIMULATION.....	62
FIGURE 4. 8: PARAMETRE DE SIMULATION.....	63
FIGURE 4. 9: LA ZONE DE SIMULATION.....	64
FIGURE 4. 10: EXECUTION.....	64
FIGURE 4. 11: LEGENDE.	64
FIGURE 4. 12: PARTIE DES RESULTATS.....	65
FIGURE 4. 13: RESULTATS DE SIMULATION DE MOD_HEED_WR.....	66
FIGURE 4. 14: RESULTATS DE SIMULATION DE L'APPROCHE MOD_HEED_R.....	67
FIGURE 4. 15: NOMBRE DES NŒUDS MORTS DANS L'APPROCHE MOD_HEED_WR.....	67
FIGURE 4. 16: NOMBRE DES NŒUDS MORTS DANS L'APPROCHE MOD_HEED_R.....	68

Liste des tableaux

Liste des tableaux

<i>TABLEAU 1. 1: COMPARAISON ENTRE LES CARACTERISTIQUES DE QUELQUES SYSTEMES D'EXPLOITATION.</i>	<i>10</i>
<i>TABLEAU 3. 1: COMPARAISON ENTRE LES TRAVAUX LIES.</i>	<i>51</i>
<i>TABLEAU 4. 1: CARACTERISTIQUES MATERIELLES.</i>	<i>54</i>

Liste des abréviations

Liste des abréviations

ADC:	Analog D igital C onverter.
Ad-hoc:	Advanced D evelopers H ands o n C onference.
CH:	Cluster H ead.
CSIP:	Cooperative S ignaling and I nformation P rocessing.
DVS:	Dynamique V oltage S caling.
GPS:	Global P ositioning S ystem.
HEED:	H ybrid E nergy E fficient D istributed approach.
LEACH:	Low E nergy A daptive C lustering H ierarchy.
MAC:	Media A ccess C ontrol.
MANTIS:	MultimodAl N eTworks of In-situ micro S ensor.
MOD_HEED:	Modified H ybrid E nergy E fficient D istributed.
MOD_HEED_R:	Modified H ybrid E nergy E fficient D istributed R elais.
MOD_HEED_WR:	Modified H ybrid E nergy E fficient D istributed W ithout R elais.
OS:	Operating S ystem
QOS:	Quality of S ervice.
RAM:	Random A ccess M emory.
RCSF:	Réseaux de C apteurs S ans F il.
SB:	Station de B ase.
SMACS:	Self-organizing M edium A ccess C ontrol for S ensor networks.
TCP:	Transmission C ontrol P rotocol.
TDMA:	Time D ivision M ultiple A ccess.
TOR :	Tout O u R ien.
UDP:	User D atagram P rotocol.
WSN:	Wireless S ensor N etwork.

Introduction générale

Les réseaux sans fil ont connu un avancement considérable depuis leur création, Le développement technologique dans le secteur des réseaux de capteurs sans fil a permis de répondre aux besoins de nombreux domaines, y compris le domaine de la surveillance, domaine médicale, notamment le domaine militaire. Grâce à leurs divers avantages, aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil sont une technologie essentielle pour divers types d'environnements intelligents.

Un RCSF ("WSN : Wireless Sensor Network" en Anglais) est un réseau Ad hoc composé généralement des petits dispositifs intelligents appelés capteurs sans fil, où un grand nombre de nœuds (micro-capteurs), installés dans des zones particulièrement éloignées qui ne contiennent pas d'infrastructure et posent un problème lorsque leurs batteries sont épuisées. Ces micro-capteurs capables de mesurer des valeurs physiques environnementales (température, lumière, pression, humidité, vibration, etc.). Ces nœuds capteurs peuvent communiquer entre eux par liaisons radio et sont capables de récolter plusieurs paramètres physiques sur l'environnement qui les entoure, appelé généralement zone de captage. Ce type de réseau a le rôle de recevoir, de traiter et de transmettre les données vers des nœuds collecteurs appelés station de base (SB) ou "sink" en Anglais.

Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil sont le routage, l'énergie consommée par les nœuds, l'agrégation de données, etc. La consommation d'énergie au niveau du capteur a un impact majeur sur la durée de vie du réseau. Par conséquent, la consommation d'énergie est un problème très courant dans les RCSFs. Ce qui rend nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau. Les recherches actuelles dans ce domaine se concentrent principalement sur la proposition des méthodes permettant de réduire la consommation d'énergie de la batterie du capteur afin de prolonger sa durée de vie. En fait, les progrès récents dans les RCSFs ont conduit au développement de nombreux protocoles de routage hiérarchique, où l'économie d'énergie est un facteur majeur.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une nouvelle approche pour minimiser la consommation d'énergie dans les RCSFs. Pour cela, nous proposons un nouveau protocole basé sur une architecture hiérarchique en combinant les deux structures hiérarchiques : une structure hiérarchique en clusters où les nœuds se regroupent dans des clusters, et pour chaque cluster on a un cluster head (CH) qui est chargé de collecter les informations à partir de nœuds membres. Et une structure hiérarchique en chaîne afin d'orienter les données collectées de relais à relais via des CHs vers la SB.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons introduire une généralité sur le RCSF. Nous discuterons

Introduction générale

également les facteurs de conception et la classification des RCSFs. Enfin, nous présentons les domaines d'application des RCSFs.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons les techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs. Nous parlerons également sur les notions de la durée de vie d'un réseau et la consommation d'énergie dans les RCSFs.

Dans le troisième chapitre, nous présente les protocoles de routage dans le RCSF et leur classification. Ensuite, nous présentons le protocole HEED et son principe de fonctionnement. Avant de terminer, nous mettons une comparaison entre les travaux liés sous forme d'un tableau.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'implémentation et l'évaluation des performances de notre protocole MOD_HEED proposé à l'aide de l'environnement MATLAB.

Nous terminions ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1:

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

- 1.1. Introduction
- 1.2. Capteur
- 1.3. Réseaux de capteurs sans fil
- 1.4. Pile protocolaire
- 1.5. Facteur de conception
- 1.6. Classification de RCSF
- 1.7. Défis de RCSF
- 1.8. Domaines d'application
- 1.9. Conclusion

1.1. Introduction

Les progrès dans ces dernières années dans les domaines de la microélectronique et des technologies de communication sans fil [1], permettent de produire à un coût raisonnable des petits appareils appelés capteurs, un grand nombre de ces appareils (micro-capteurs) déployés sur une zone géographiquement appelées zone d'intérêt ou zone de captage.

Les RCSFs des réseaux de nœuds sans fil dédiés à des applications spécifiques. Ils sont constitués d'un ensemble de dispositifs capables de collecter, de stocker, de traiter et d'effectuer une transmission sans fil vers un nœud considéré comme "point de collecte" appelée station de base.

Dans ce chapitre, nous allons introduire un aperçu général sur le RCSF. Nous commençons par une définition d'un capteur, ses types, son architecture, nous donnons aussi quelques définitions sur le capteur sans fil. Ensuite, nous introduisons les réseaux de capteurs sans fil et leurs architectures. Avant de conclure ce chapitre, nous discuterons des facteurs de conception et de la classification des RCSFs, et enfin leur domaine d'application.

1.2. Capteur

1.2.1. Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée (température, pression, humidité, etc.) en une grandeur utilisable (intensité électrique), et chaque capteur est constitué au minimum d'un transducteur. [2]

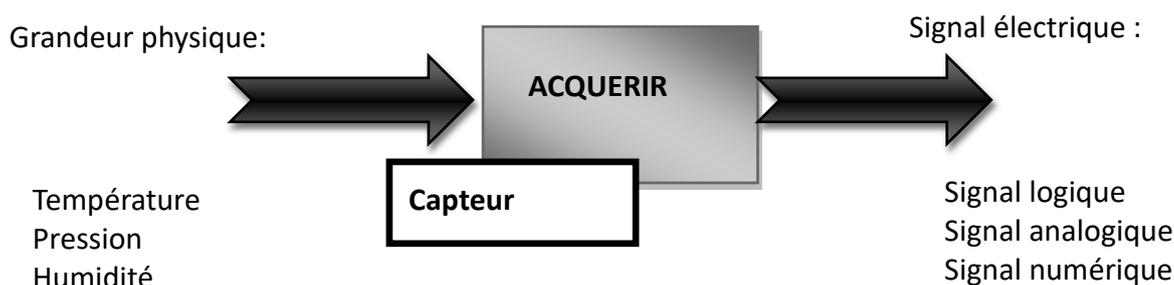


Figure 1.1: Schéma d'un capteur [18].

Globalement, les caractéristiques du capteur sont: [13]

- **Étendu de mesure** : Valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur.
- **Sensibilité** : S'exprime par la variation de la grandeur de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

- **Résolution.**
- **Précision :** C'est la qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.
- **La rapidité :** C'est le temps de réaction d'un capteur. Elle est liée à la bande passante.

1.2.2. Les types de capteurs :

Nous pouvons caractériser les capteurs selon deux critères : [18]

- en fonction de la grandeur mesurée : on parle de capteurs de position, de température, de vitesse, de force, de pression etc.



Capteur de température



Capteur de vitesse



Capteur de position

Figure 1.2: Quelques exemples de capteurs.

- en fonction du caractère de TOR l'information délivrée ; on a les capteurs logiques appelés aussi capteurs tout ou rien (TOR), les capteurs analogiques ou numériques.

a. Les capteurs logiques (TOR)

Ils produisent des signaux de type binaire (deux états). L'avantage est qu'ils ne sont pas chers, mais ils sont spécialisés dans un type précis de mesure.

b. Les capteurs numériques

Les capteurs numériques délivrent en sortie une information électrique numérique, Le signal de sortie peut être récupéré en série ou en parallèle. Ce type de capteur donne en sortie une valeur finie. Par exemple, si une grandeur physique croît de manière linéaire, Le signal de sortie donnera soit une information du type TOR (Tout Ou Rien), un train d'impulsion ou un échantillonnage. [15]

c. Les capteurs analogiques

La grandeur de sortie est en relation directe avec la grandeur d'entrée. Dans ce cas le capteur doit être linéaire sinon nous aurions un signal déformé, Un signal analogique si l'amplitude de la grandeur physique qu'il représente peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné. L'avantage de ce type est que nous avons la possibilité de mesurer sur toute la zone, pas seulement sur un seuil.

On peut classer ce type à deux catégories : [3]

- **Capteurs actifs**

Fonctionnant en générateur, son principe est basé sur des effets physiques qui permettant de transformer directement la grandeur physique en grandeur électrique. On utilise ce type de capteur pour assurer des mesures continues en temps réel.

- **Capteurs passifs**

Un capteur passif est un appareil qui nécessite une source d'énergie, il s'agit généralement d'impédance, dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. Et aussi permet de déduire cette valeur. [15]

La variation d'impédance résulte :

- soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (Armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

1.2.3. Capteur sans fil

❖ Définition 1

Un capteur sans fil est un petit appareil électronique capable d'effectuer des mesures simples, comme la température, la pression, la vibration, etc. Chaque capteur remplit trois fonctions principales : collecter, traiter et transmettre des informations à un ou plusieurs points de collecte appelés stations de base (SB).

❖ Définition 2

Le transmetteur de données sans fil dispose d'un capteur intégré, un système électronique de mesure et un émetteur radio. Le signal radio est interprété par un récepteur, qui convertit le signal sans fil en la sortie souhaitée, telle qu'un courant analogique, USB ou Ethernet, pour partager des données sur un réseau informatique [14].

1.2.4. Les composants de capteur

1.2.4.1. Architecteur matérielle d'un capteur

Un nœud capteur contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de communication, et l'unité d'énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine

d'application, comme par exemple un système de localisation telle qu'un GPS (Global Positioning System), ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer en cas de nécessité.

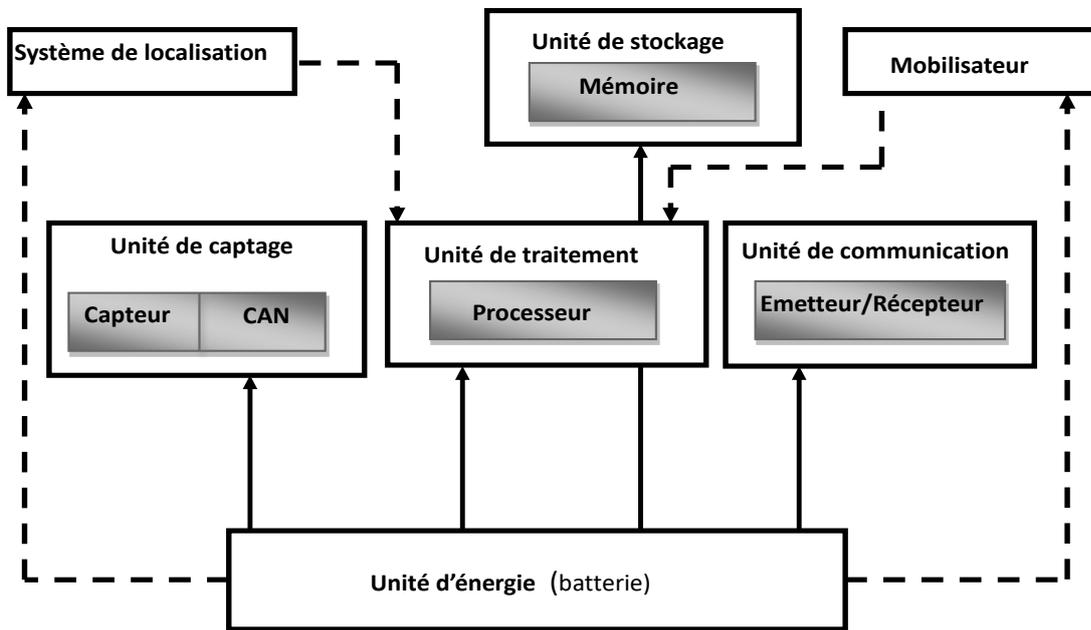


Figure 1.3: Architecture d'un nœud de capteur.

a. Unité d'énergie (Power unit)

Cette unité responsable de la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur. Généralement, elle consiste en une batterie qui est limitée et irremplaçable, ce qui a rendu l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie totale du réseau de capteurs.

b. Unité de captage (Sensing unit)

La fonction principale de l'unité de captage est de mesures ou capture les données physiques. Généralement elle est composée de deux sous-unités unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, Ainsi le convertisseur analogique-numérique (ADC : Analog Digital Converter" en Anglais) transforme ces signaux en données numériques et les transmet à l'unité de traitement. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage. [16]

c. Unité de traitement (Processing unit)

Cette unité est composée d'un processeur et d'une mémoire. Elle a deux interfaces une pour l'unité d'acquisition (captage) et l'autre pour l'unité de transmission (communication). Elle est responsable d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer entre les nœuds du réseau. Elle acquiert aussi les données en provenance de l'unité de captage et les envoie à l'unité de communication ou bien les stocke en mémoire.

d. Unité de communication (Transceiver unit)

Elle est responsable de toutes les émissions et réceptions de données, il utilise un émetteur/récepteur pour assurer toutes les émissions et réceptions de données.

e. Unité de stockage (Mémoire)

L'unité de stockage inclut la mémoire de programme (dont les instructions sont exécutées par le processeur) et la mémoire de données (pour conserver des données fournies par l'unité de captage et d'autres données locales). La taille de cette mémoire est souvent limitée essentiellement par les considérations économiques et s'améliorera aussi probablement au fil des années. [8]

1.2.4.2. Architecteur logiciel (Systèmes d'exploitation):

Le système d'exploitation (OS : Operating System) agit comme un gestionnaire de ressources pour les systèmes complexes, ont été développés pour répondre aux contraintes particulières des réseaux de capteurs. Les possibilités matérielles des capteurs sont limitées en mémoire, en puissance de calcul et en autonomie énergétique (batterie). Ces systèmes d'exploitation ont une « faible empreinte mémoire » lors de leurs embarquement dans la mémoire flash des capteurs. [9]

Il existe plusieurs systèmes d'exploitation pour les réseaux de capteurs sans fil, le système plus connu est *TinyOS*.

❖ *TinyOS*

TinyOS est un système d'exploitation intégré, modulaire, destiné aux réseaux de capteurs miniatures, conçu pour les capteurs sans fils et développé par l'Université de Berkeley. En fait, *TinyOS* est le système d'exploitation le plus courant pour les réseaux de capteurs sans fil. Utilisé dans les plus grands projets de recherche, il permet une intégration très rapide des innovations liées aux avancées des applications et du réseau lui-même, tout en minimisant la taille du code source en raison des problèmes de mémoire inhérents aux réseaux de capteurs. Les bibliothèques *TinyOS* incluent des protocoles réseau, des services de distribution, des pilotes de capteur et des outils d'acquisition de données. Généralement Les applications pour *TinyOS* sont écrites en langage NesC (Network Embedded System C), une extension du langage programmation C. [10]

TinyOS est conçu pour minimiser la consommation d'énergie du capteur. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est active, il se met automatiquement en veille, ce qui permet au capteur de rester dans un état de veille le reste du temps afin de préserver son énergie. Donc le but de *TinyOS* est de prolonger la durée de vie du capteur.

Autres systèmes d'exploitation pour les RCSF

❖ *Contiki* [11]

C'est un système d'exploitation open-source multitâche, léger écrit en langage C, développé pour les systèmes embarqués avec contraintes de mémoire. L'architecture hybride du noyau Contiki permet deux modes de fonctionnement : multitâche ou événementiel. Contiki est un système d'exploitation conçu pour de minuscules modules de capteurs sans fil, qui occupe peu d'espace mémoire et consomme très peu d'énergie. Contiki fournit un multitâche préventif qui peut être utilisé au niveau du processus individuel. Une configuration Contiki typique consomme 2 kilo-octets de RAM et 40 kilo-octets de ROM. Une installation complète de Contiki comprend des fonctionnalités telles que: noyau multitâche, multithreading préventif, proto-threads, réseau TCP / IP, IPv6, une interface utilisateur graphique, un navigateur Web, un serveur Web personnel, un client Telnet simple, un économiseur d'écran et un système informatique de réseau virtuel.

La communication entre les processus se fait par l'envoi d'événements. Pour obtenir le mode multitâche, une bibliothèque doit être installée. Les fonctions associées à cette bibliothèque n'accèdent pas directement à l'ensemble des ressources du capteur sans fil. Dans certains cas, elles doivent appeler des parties du noyau dédiées à la gestion des événements.

❖ **MANTIS OS**

MANTIS (Multimodal NeTworks of In-situ micro Sensor) OS, est un système d'exploitation multitâche, léger et économe en énergie pour les capteurs adapté aux applications où plusieurs traitements, conçu pour les capteurs sans fils et développé par l'université du Colorado (USA) et écrit en langage C. le noyau MOS est capable de réaliser une exécution planifiée de manière préventive multithread avec un standard Synchronisation des E/S et pile de protocoles réseau, le tout pour moins de 500 octets de RAM, sans compter les tailles de pile de threads individuelles.

En outre, MANTIS OS est conçu pour fournir une prise en charge multiplateforme sur PC, PDA, ainsi que diverses plates-formes matérielles de micro-capteurs. MANTIS est un système dynamique, des modifications d'application peuvent être faites pendant le fonctionnement.

En tant qu'avantages supplémentaires à cette approche multiplateforme, MOS permet de réutiliser le code et de créer une faible barrière à l'entrée en termes de programmation pour les réseaux de capteurs. [12]

Tableau 1.1 : Comparaison entre les caractéristiques de quelques systèmes d'exploitation

Caractéristiques Systèmes d'exploitation	Langage de programmation	Architecture	Gestion de mémoire	Modèle de programmation
TinyOS	NecC	Monolithique	Mémoire statique	Evènementielle
Contiki	C	Modulaire	Mémoire dynamique	Evènementielle et multitâche

MANTIS OS	C	Sous forme des couches	Mémoire dynamique	Multitâche

1.3. Réseau de capteurs sans fil (RCSF)

1.3.1. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF)

Un réseau de capteur sans fil (RCSF), ou Wireless Sensor Network (WSN) en anglais est un type spécial de réseau ad-hoc (Advanced Developers Hands on Conference) défini par un ensemble de nœuds capteurs placés de manière plus ou moins aléatoire dans une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène quelconque et de récolter des données d'une manière autonome. Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil (Zig Bee ou Wifi) pour acheminer les données captées avec un routage multi-sauts vers un nœud considéré comme "point de collecte" appelé sink ou station de base. Le puits transmet ensuite ces données par satellite ou par Internet à l'ordinateur central « Gestionnaire de réseau » pour analyser ces données et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt. [4]

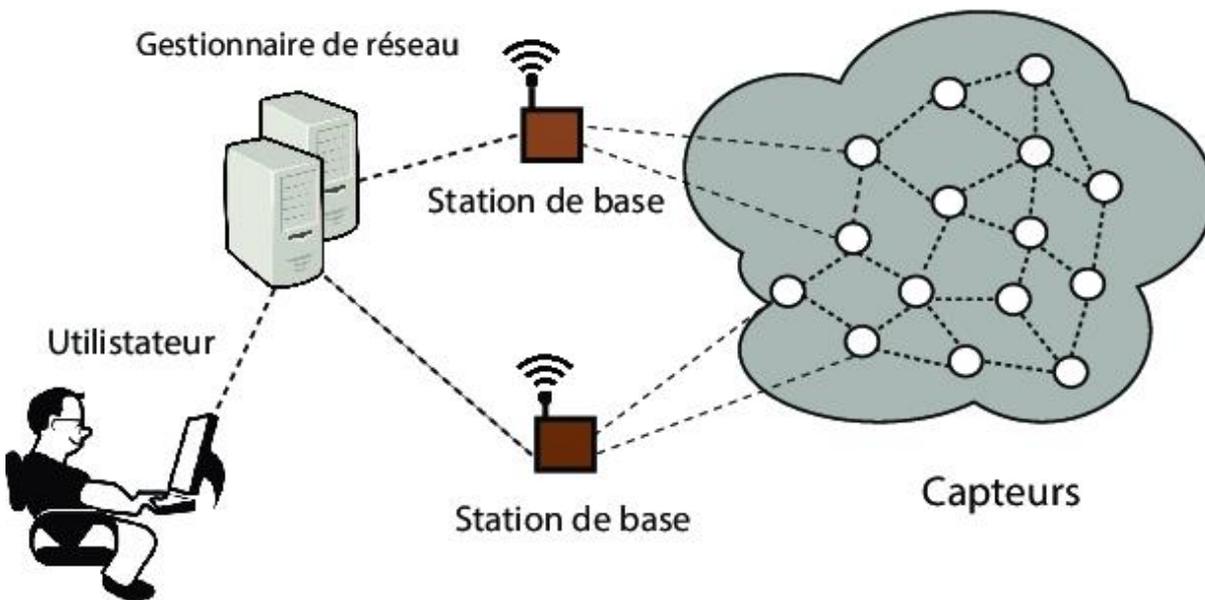


Figure 1.4: Architecture d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

1.3.2. Les caractéristiques de RCSF

Parmi les caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil, nous citons les plus importantes :

- Limitations de consommation d'énergie pour les nœuds de capteur.
- Durée de vie limitée.
- Bande passante limitée.
- Mobilité des nœuds.

- Agrégation des données.
- Capacité de déploiement à grande échelle.
- Capacité à survivre à des conditions environnementales difficiles.
- Aide à utiliser facilement.

1.4. Architecteur protocolaire

Dans le but d'un établissement efficace d'un réseau de capteur sans fil, on utilise une architecture en couches pour améliorer la robustesse du réseau. Une pile protocolaire de cinq couches (couche application, couche transport, couche réseau, couche liaison de données ,couche physique.) utilisée par les nœuds du réseau, cette pile possède trois niveaux(plans) de gestion : le plan de gestion des tâches qui permet de affecter les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de mobilité qui permet de conservée une image des emplacements des nœuds pendant la phase de routage, et le plan de gestion de l'énergie qui permet des économies d'énergie maximales [44].

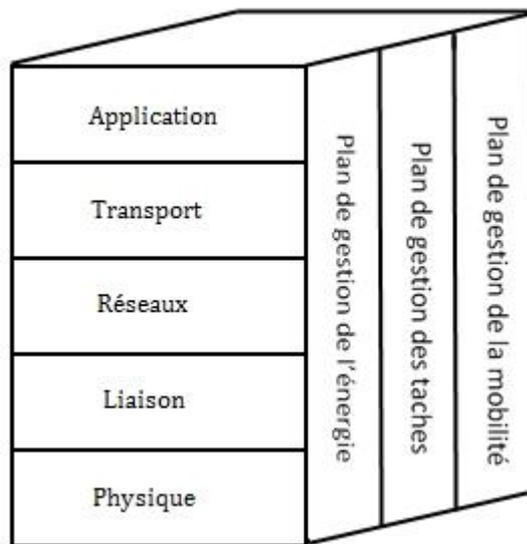


Figure 1.5 : La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs.

1.4.1. Les Couches de la pile protocolaire [6]

• **Couche application**

C'est la couche la plus proche des utilisateurs, elle assure l'interface avec les applications.

• **Couche transport**

Elle vérifie la qualité de la transmission et le bon acheminement des informations, la retransmission, elle utilise aussi un protocole de transport proche du protocole UDP et appelé UDP-Like (User Datagram Protocol Like) et le protocole TCP (Transmission Control Protocol).

• **Couche réseau**

Elle s'intéresse à guider les données fournies par la couche de transport. Le but de cette couche est de trouver une route et une transmission fiable des données entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie. En plus, elle permet aussi d'allocation de ressources, routage, la découverte des voisins, etc.

- **Couche liaison de données**

Elle est responsable du contrôle d'erreurs (la détection et la correction), et le contrôle de puissance, de l'accès au media, etc. De plus, elle assure la liaison point à point et établit une communication saut-par-saut entre les nœuds. Quelques protocoles de liaison de données: SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks) et EAR (Eavesdrop And Register).

- **Couche physique**

Elle permet de moduler les données et le diriger avec choisir les bonnes fréquences dans le media physique.

1.5. Facteur de conception [5]

Il existe de nombreux facteurs qui influencent La conception des réseaux de capteurs, et représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes dans les réseaux de capteurs. Nous pouvons résumer les principaux facteurs comme suite :

- **La tolérance de fautes**

Parfois les nœuds capteurs peuvent ne plus fonctionner ou bien générer des erreurs à cause d'un problème physique, d'un manque d'énergie ou une interférence. Mais ces erreurs n'affectent pas le reste du réseau, et c'est ça le principe de la tolérance de fautes. La tolérance de fautes est la capacité de maintenir les fonctions du réseau et de continuer sans être affecté dues à une erreur ou d'un arrêt d'un ou plusieurs capteurs.

- **L'échelle**

Le nombre de nœuds déployés par un projet peut atteindre des millions. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et cela peut poser des difficultés dans le transfert de données, il est essentiel que le puits "sink " soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues de capteurs.

- **Les coûts de production**

Un réseau de capteurs se compose généralement d'un grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est crucial afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Par conséquent, la réduction des coûts de production jusqu'à moins de 1 \$ par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil.

- **L'environnement**

Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité...etc. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner dans des régions géographiques éloignées sans surveillance.

- **La topologie de réseau**

La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide, parce que les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles ou capable de défaillance d'un nœud. C'est pour cette raison Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance qui consiste d'une trois phases : le Déploiement, Post-déploiement et le Redéploiement.

- **Les contraintes matérielles**

La principale contrainte matérielle liée aux RCSFs est la Dimension : c'est la taille réduit des capteurs peut présenter de nombreux avantages, elle permet un déploiement flexible et simple du réseau. Grâce à la petite taille de ces derniers, la puissance des batteries est limitée.

- **Les médias de transmission**

Dans un réseau de capteurs, Les nœuds communicants sont reliés sans fil. Afin de permettre l'exploitation de ces réseaux dans le monde entier, le support de transmission doit être standardisé. Ce lien peut être réalisé par souvent un signal infrarouge, une communication radio ZigBee, Bluetooth ou un média optique.

- **La consommation d'énergie**

L'un des principaux problèmes dans les réseaux de capteur est L'économie d'énergie. De plus, la recharge des sources d'énergie est souvent très cher et parfois impossible, ces opérations sont énergivores. Donc, il faut que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner, et c'est pour ça les recherches actuelles se concentrent sur les moyens de réduire la consommation d'énergie.

1.6. Classification de RCSF [5]

Les caractéristiques d'un RCSF seront différentes de celles d'un autre RCSF. Quelle que soit l'application, les réseaux de capteurs sans fil en général peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- **Statique et mobile**

Tous les nœuds de capteurs dans plusieurs applications peuvent être définis sans mouvement, de sorte que ces réseaux sont des WSN statiques. Surtout dans certaines applications telles que les systèmes biologiques, les nœuds de capteurs mobiles sont appelés réseaux mobiles. Le meilleur exemple de réseau mobile est la surveillance des animaux.

- **Déterministe et non déterministe**

Dans un réseau de type déterministe, la disposition des nœuds de capteurs peut être fixée et calculée. Le fonctionnement pré-planifié de ce nœud de capteur peut être possible dans simplement certaines applications. Dans la plupart des applications, l'emplacement des nœuds de capteurs ne peut pas être déterminé en raison de différents facteurs tels que des conditions de fonctionnement hostiles et un environnement difficile, de sorte que ces réseaux sont appelés non déterministes et nécessitent un système de contrôle complexe.

- **Station de base unique et station de base multiple**

Dans un réseau à une seule station de base, une seule station de base est utilisée et elle peut être disposée très près de la région du nœud de capteur. L'interaction entre les nœuds capteurs peut se faire via la station de base. Dans un réseau de type station de base multiple, plusieurs stations de base sont utilisées et un nœud de capteur est utilisé pour déplacer les données vers la station de base à proximité.

- **Station de base statique et station de base mobile**

Les stations de base sont soit mobiles, soit statiques, similaires aux nœuds de capteurs. Comme son nom l'indique, la station de base de type statique comprend une position stable généralement proche de la zone de détection tandis que la station de base mobile se déplace dans la région du capteur afin que la charge des nœuds capteurs puisse être équilibrée.

- **WSN à saut unique et à sauts multiples**

Dans un réseau de type à saut unique, la disposition des nœuds de capteurs peut être effectuée directement vers la station de base alors que, dans un réseau à sauts multiples, les têtes de cluster et les nœuds homologues sont utilisés pour transmettre les données afin de réduire la consommation d'énergie.

- **Auto-reconfigurable et non-auto-configurable**

Dans un réseau non auto-configurable, l'agencement des réseaux de capteurs ne peut pas être effectué par eux au sein d'un réseau et dépend d'une unité de contrôle pour la collecte de données. Dans les réseaux de capteurs sans fil, les nœuds de capteurs maintiennent et organisent le réseau et travaillent en collaboration en utilisant d'autres nœuds de capteurs pour accomplir la tâche.

- **Homogène et hétérogène**

Dans un réseau de capteurs sans fil homogène, tous les nœuds de capteurs incluent principalement une utilisation d'énergie, des capacités de stockage et une puissance de calcul similaires. Dans le cas d'un réseau hétérogène, certains nœuds de capteurs incluent une puissance de calcul élevée ainsi que des besoins énergétiques par rapport à d'autres. Les tâches de traitement et de communication sont séparées en conséquence.

1.7. Défis de RCSF [4]

La plupart des défis techniques lancés par la communauté des chercheurs sont résumés dans la découverte du réseau, le routage, la couverture, la durée de vie, le contrôle du réseau, le traitement collaboratif des

données, mais ces dernières années, Les axes de recherches se sont passé des problèmes généraux à beaucoup plus que cela.

Peuvent être classifiés comme suit :

Le défi de gestion

Contrôler la communication sur les réseaux hétérogènes représente un défi de base dans le système auto-contrôlant du fait que les politiques et les protocoles de communication projettent un rôle important dans la communication du réseau. En outre, il est nécessaire d'équilibrer le niveau du détail que le réseau fournit au client par rapport au taux auquel l'énergie est consommée tout en recueillant les données. Clairement, il est préférable d'avoir le réseau qui fait automatiquement cet accord, plutôt que d'exiger une intervention manuelle.

Conception des capteurs

Trouver de nouvelles conceptions adéquates et spécifiques pour des environnements donnés (Détecteur de chute, vêtement intelligents, Capteurs multimédia...).

Protocoles de communication

Trouver des nouvelles techniques et de nouveaux protocoles de communication qui prend en compte l'évitement du vide, les collisions.

Récupération d'énergie et optimisation

Trouver de nouvelles visions d'optimisations.

Aspect sécurité

Comme l'authentification d'information et les algorithmes de cryptage adaptés pour les réseaux de capteurs sans fil.

Conception de middleware

Nouvelles plateforme dédiées au RCSF.

Les défis actuels dans les réseaux de capteurs se résument

Au **niveau matériel** à la miniaturisation (nano-capteur), l'amélioration de la fiabilité d'acquisition au **niveau physique**, le développement des nouveaux protocoles au **la couche MAC** pour améliorer la Qualité de service, au **niveau de routage** équilibrage de charge peut être réalisé pour développer de nouveaux aspects de routage afin d'augmenter la durée de vie, au **niveau transport** trouver des nouveaux mécanismes plus efficaces de control de flux, au **niveau application** est spécialement liés aux applications de traitement de l'information et le développement des logiciels.

1.8. Domaines d'application

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, l'adaptabilité et la communication sans fil permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils

permettent aussi d'étendre le domaine des applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes. Parmi ces domaines se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter la surveillance, le militaire, le médical, le climatique, la santé, le scientifique [45]. Voici quelques exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines :

1.8.1. Applications militaires

Le domaine militaire c'est considéré comme moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil approprié dans un tel domaine. Déploiement sur un point stratégique ou difficile à atteindre, afin d'analyser le terrain avant d'envoyer des troupes ou de surveiller les activités des forces ennemies (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) [46].



Figure 1. 6 : l'utilisation des RCSF dans le service militaire.

1.8.2. Applications médicales

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés en médecine pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux du corps humain, grâce à de minuscules capteurs pouvant être avalés ou implantés sous la peau (suivi de la glycémie, détection des cancers). Ils facilitent aussi le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : battements du cœur, la tension artérielle, etc. grâce à des capteurs qui ont chacun une tâche spécifique et bien particulière. Par exemple, de minuscules caméras qui peuvent être ingérées peuvent transmettre des images de l'intérieur du corps humain sans recourir à la chirurgie [47].

1.8.3. Application commerciales

Peuvent être utilisés les réseaux de capteurs dans le domaine commercial dans les opérations de stockage et de livraison, pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Ainsi le client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir connu la position actuelle de sa commande et un avis de livraison en temps réel [48]. Pour les entreprises de fabrication, les réseaux de capteurs autorisés à surveiller le processus de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises peuvent fournir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.

1.8.4. Application environnementale

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux, ils utilisent pour déterminer les valeurs de certains paramètres dans un endroit donné, tel que la température, la pression atmosphérique, etc. En dispersant des nœuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements, surveiller les catastrophes naturelles, surveiller des phénomènes météorologique, détection de la pollution [47].

1.8.5. Application à la surveillance

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de sécurité peut diminuer largement les dépenses financières dédiées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure [49].

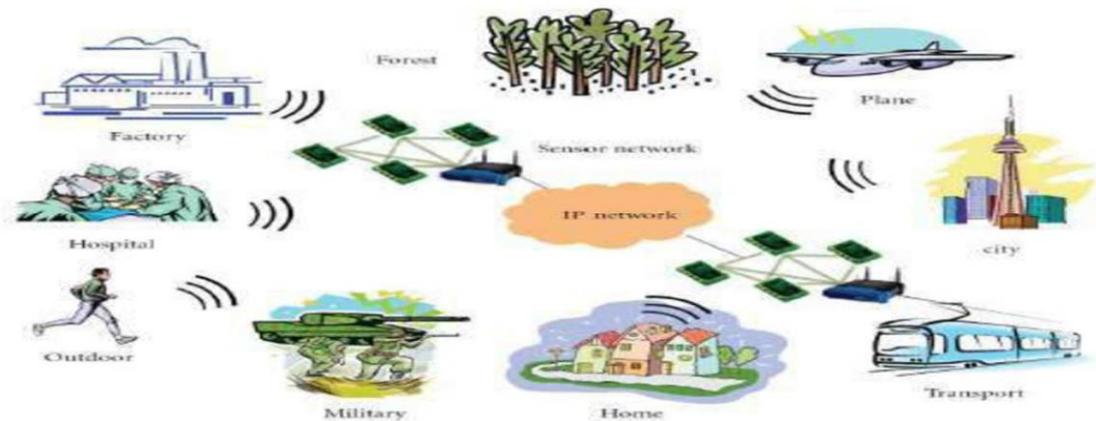


Figure 1. 7 : Domaines d'application dans les réseaux de capteurs.

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une généralité sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons présenté les RCSF, leurs architectures, la pile protocolaire, leurs défis et leurs utilisations. En effet, les RCSFs sont très utilisés dans plusieurs domaines grâce à leurs caractéristiques variées et leur faible cout de production.

Dans le chapitre suivant nous parlerons en détaille sur les techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs.

Chapitre 2:

Techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs.

Sommaire

- 2.1. Introduction
- 2.2. Notion de durée de vie d'un réseau
- 2.3. Consommation d'énergie dans les RCSF
- 2.4. Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie
- 2.5. Sources de la surconsommation d'énergie
- 2.6. Conservation d'énergie
- 2.7. Technique de minimisation de la consommation d'énergie
- 2.8. Conclusion

2.1. Introduction

La consommation d'énergie est très importante dans les réseaux de capteurs, car les nœuds capteurs sont généralement alimentés par des batteries et la durée de vie de ces dispositifs d'être un défi majeur et un facteur clé. Ainsi la durée de vie du réseau considère comme mesure de la consommation d'énergie. Afin de prolonger sa durée de vie, ils doivent gérer judicieusement leur consommation d'énergie. Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès réalisés, elle nécessite encore plus de recherches sur l'efficacité énergétique.

Dans ce chapitre, nous introduisons des techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs. Nous parlerons de la durée de vie d'un réseau, la consommation d'énergie dans les RCSFs, et enfin nous présentons les méthodes de conservation d'énergie.

2.2. Notion de durée de vie d'un réseau

La durée de vie du réseau est considérée comme l'indicateur le plus important pour évaluer les réseaux de capteurs. Dans un environnement aux ressources limitées, la consommation d'énergie de chaque nœud de capteur doit être prise en compte. Un réseau ne peut atteindre ses objectifs que lorsqu'il est « vivant ». Dans tout déploiement de capteur, l'espérance de vie est critique [19].

La durée de vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps pendant laquelle le réseau peut maintenir une connectivité suffisante, couvrir l'ensemble du domaine ou maintenir le taux de perte d'informations en dessous d'un certain niveau selon la situation. Par conséquent, la durée de vie du système est liée à la durée de vie du nœud, même si elle peut être différente de celle-ci. La durée de vie d'un nœud correspond à la durée de vie d'un des nœuds du réseau. Il dépend principalement de deux facteurs : l'énergie dépensée dans le temps et la quantité l'énergie dont il dispose. Il existe plusieurs définitions pour ce paramètre de mesure. Elle peut être définie par la durée jusqu'à la mort du premier nœud. Elle peut également être définie par le temps où une proportion de nœuds morts. Si la proportion de nœuds morts dépasse un certain seuil, ce qui peut conduire à ne couvrir pas les sous-zones et/ou les partitions réseau [19]. Nous résumons les définitions les plus courantes ci-dessous :

- La durée de vie d'un réseau est définie par la durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie.
- La durée de vie est définie par la durée jusqu'à ce que le premier Cluster Head épuise toute son énergie.
- Demi-vie du réseau : la durée jusqu'au moment où 50% des nœuds épuisent leur énergie et cessent de fonctionner.
- La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie.

- Dans [20] Giridhar et Kumar, présentent la durée de vie d'un réseau de capteur sans fil comme étant liée à l'application et aux protocoles utilisés.
- Dans [21] Chen et Zhao, définissent la durée de vie comme étant une mesure liée à la vie des nœuds du réseau.
- Dans [22] Quant à Esseghir et al, définissent la durée de vie comme étant une autre mesure qui est liée à l'accessibilité des nœuds dans le réseau.
- Dans [23] Hu et Li, définissent la durée de vie comme étant liée à la qualité de service QoS.
- D'autres développeurs comme Verdone et al. [24], définissent la durée de vie comme une mesure liée à la répartition spatiale des nœuds dans le réseau.

2.3. Consommation d'énergie dans les RCSF

Un nœud capteur consomme son énergie pour effectuer trois processus de base : l'acquisition des données (capture), la communication et le traitement des données [25].

2.3.1. Niveau capture

L'énergie de capture est consommée pour effectuer les tâches suivantes : échantillonnage, traitement du signal, conversion analogique-numérique et activation de la sonde de capture. Généralement, L'énergie de capture ne représente qu'une petite partie de l'énergie totale consommée par un nœud.

2.3.2. Niveau de communication

L'énergie de communication représente la plus grande partie de l'énergie consommée par le nœud capteur. Cette énergie est déterminée par la quantité de données à communiquer, la distance de transmission et les caractéristiques physiques du module radio, elle divise en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de transmission. L'énergie totale pour la communication est la somme de l'énergie consommée par le circuit de transmission, l'amplificateur (dont le but est d'amplifier le signal selon la distance l'émetteur et le récepteur), et le circuit de réception.

2.3.3. Niveau traitement de données

L'énergie de traitement se représente en deux parties, la première partie : le traitement des instructions (l'énergie de commutation) déterminée par la tension d'alimentation et la puissance totale commutée au niveau du logiciel (par l'exécution d'un logiciel) et la deuxième partie : l'énergie de fuite (le fonctionnement du microcontrôleur et des mémoires).

2.4. Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous:

2.4.1. État du module radio

Le module radio est le composant le plus énergivore du nœud capteur car il assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil [26].

- **État actif :** La radio est allumée, mais pas en cours d'utilisation. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état peut entraîner une perte d'énergie due à une écoute inutile du canal de transmission.
- **État sommeil:** la radio est mise hors tension.
- **État transmission:** la radio transmet un paquet.
- **État réception:** la radio reçoit un paquet.

Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC [50].

2.4.2. Accès au medium de transmission(MAC)

La couche MAC joue un rôle important dans la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie. Les principales raisons de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC sont les suivants [27] :

2.4.2.1. La retransmission

Les nœuds de capteur ont généralement une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. La retransmission de paquets perdus peut entraîner une perte forte d'énergie.

2.4.2.2. L'écoute active

L'écoute active du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie. Pour éviter ce problème, il faut basculer le nœud en mode sommeil aussi longtemps que possible.

2.4.2.3. Surécoute

Le phénomène de surécoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (Figure 2.1).

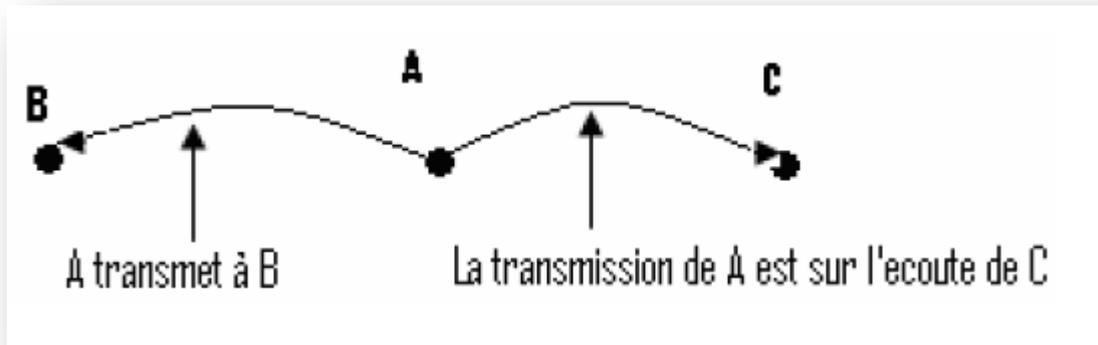


Figure 2.1: La

surécoute dans une transmission [27].

2.4.2.4. Surcharge

Plusieurs protocoles de la couche MAC assurent différentes fonctions en échangeant des messages de contrôle (overhead) : signalisation, connexion, établissement du plan d'accès et évitement des collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle.

2.4.2.5. Surémission

La surtransmission (overemitting) se produit lorsqu'un nœud capteur envoie des données à un récepteur qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle.

2.4.2.6. Taille des paquets

La taille des messages échangés dans le réseau a un impact sur la consommation énergétique des nœuds émetteur et récepteur. Par conséquent, la taille des paquets ne peut être ni trop élevée ni trop faible.

En fait, s'il est petit, le nombre de paquets de contrôle (accusés de réception) générés augmente la surcharge. Sinon, les grandes tailles de paquets nécessitent une grande puissance de transmission.

2.4.3. Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance reçue moyenne d'un signal radio à une distance donnée de l'émetteur. La propagation des signaux radio est souvent affectée par différents phénomènes : réflexion, diffraction et diffusion par divers objets [28].

2.5. Sources de la surconsommation d'énergie [44, 51, 52]

La surconsommation ou L'énergie gaspillée est toute consommation d'énergie qui dépasse le seuil normal. Cela peut être causé par divers phénomènes qui font que les nœuds de capteurs gaspillent de l'énergie.

- *L'écoute passive (idle)*

Les nœuds capteurs sortent périodiquement de leur état de veille afin d'écouter le trafic dans le réseau. Cette écoute peut indiquer s'il y a des données sur le réseau à recevoir ou à se connecter. Cependant, dans le

cas de réseaux à faible trafic, ce snooping peut être très coûteux. En effet, le nœud capteur peut écouter le trafic sans pour autant recevoir ou transmettre des données, ce qui va gaspiller inutilement ses réserves d'énergie. De plus, la transition périodique entre le sommeil et l'écoute engendrera une autre source de surconsommation d'énergie, surtout dans le cas où celle-ci n'est pas contrôlée.

- ***Les collisions***

À cause de leur environnement de communication sans fil, les réseaux de capteurs sont fortement exposés aux interférences et aux collisions. Ces dernières sont générées lorsque deux ou plusieurs nœuds adjacents transmettent leurs données en même temps. En fait, les collisions sont considérées comme la source la plus importante de gaspillage d'énergie, car elles entraînent des retransmissions de paquets en collision, qui sont très coûteuses en termes d'énergie.

- ***La puissance de transmission***

La portée de l'antenne radio est directement liée à la puissance d'émission utilisée. La plupart des nœuds capteurs possèdent des antennes à portée statique dans lesquels la puissance de transmission est fixée précédemment par les concepteurs. Par conséquent, un nœud capteur peut gaspiller pas mal d'énergie en utilisant une grande puissance de transmission afin de communiquer avec un nœud très proche de lui.

- ***Les distances de transmission***

Afin d'économiser de l'énergie, il est préférable de réduire la distance de transmission entre les nœuds. Par conséquent, la communication à sauts multiples est généralement demandée dans les réseaux de capteurs sans fil, ce qui est différent de la communication basée à un seul saut dans laquelle la dissipation d'énergie est très élevée.

- ***L'écoute abusive (Overhearing)***

Un nœud capteur peut recevoir toutes les données échangées entre ses voisins, même si ces dernières ne lui sont pas destinées. L'intensité de cette écoute abusive est proportionnelle à la densité du réseau. Ainsi, cela peut engendrer un grand gaspillage d'énergie, vu que la majorité des RCSFs sont déployés à grande échelle.

- ***Le surcoût des paquets de contrôle (Overhead)***

L'échange des paquets de contrôle peut être une autre source de gaspillage d'énergie, principalement si le nombre de paquets de contrôle est inutilement élevé.

2.6. Conservation d'énergie

En général, les techniques d'économie d'énergie se concentrent sur deux parties : la partie réseau (la gestion d'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception de protocoles réseau), et la partie détection (des techniques sont utilisées pour réduire le nombre ou la fréquence de l'échantillonnage coûteux en énergie). Afin de l'économie d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil, il

existe des méthodes pour la conservation d'énergie, Parmi ces méthodes : les Techniques basées sur le cycle d'activité (Duty-cycling), les Techniques orientées données et les techniques basées sur la mobilité [53].

2.6.1. Techniques du Duty-cycling

Cette technique est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace d'économiser de l'énergie consiste à mettre l'émetteur radio en mode veille (faible consommation) lorsque la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer ou à recevoir, et doit être prête dès que de nouveaux paquets doivent être envoyés ou reçus. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau Ce comportement est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est dénommé D comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs. Comme les nœuds capteurs exécutent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Par conséquent, l'algorithme Sommeil/Réveil accompagne tout programme de cycle d'activité. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué basé sur des nœuds qui décident de la date de basculement entre les états actif et sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend la commutation de paquets possible même si les nœuds ont un faible rapport cyclique (c'est-à-dire qu'ils dorment la plupart du temps) [19].

2.6.2. Techniques orientées données

Les approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. En fait, la détection (ou prélèvement de données) affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- Des échantillons inutiles : les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelle [29], il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la SB. Un échantillonnage inutile signifie une consommation d'énergie inutile. En effet, même si le coût d'échantillonnage est négligeable, il induit une communication sur tout le long du chemin qu'emprunte le message.
- La consommation électrique du module de détection : réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur.

Les techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données tout en garantissant un niveau acceptable de précision de détection pour l'application.

2.6.3. Techniques de Mobilité

La mobilité des nœuds, lorsque cela est possible, peut être une solution efficace pour réduire la consommation d'énergie. En fait, dans les réseaux de capteurs statiques, les paquets provenant des nœuds suivent un chemin multi-sauts à travers le réseau jusqu'au récepteur. Lorsque le récepteur lui-même est

statique, certains chemins peuvent être plus occupés que d'autres, selon la topologie du réseau et le taux de génération de paquets au nœud source.

Généralement, les nœuds proches du Sink (SB) sont chargés de transférer un plus grand nombre de paquets et donc verront leur niveau de batteries s'épuiser rapidement. Cela se produira même si des techniques de conservation d'énergie, comme listées ci-dessus, sont mises en place.

Des nœuds collecteurs mobiles, connus sous le nom de Data Mules [30], permettent de réduire la consommation d'énergie. En effet, il s'agit d'appareils mobiles dont nous pouvons contrôler le mouvement pour fournir une alternative à la collecte classique des données à partir des nœuds capteurs dispersés dans l'espace. Les data mules circulent dans la zone de supervision et entrent en communication avec chaque nœud quand il se trouve à sa proximité. Ainsi, les nœuds statiques attendront le passage du data mule pour lui transférer leurs données. Ce dernier se chargera du routage des données vers le Sink. Par conséquent, les nœuds de capteurs statiques peuvent économiser de l'énergie en réduisant la longueur du chemin de routage, les conflits et la surcharge de diffusion [19].

2.7. Technique de minimisation de la consommation d'énergie

Dans les réseaux de capteurs sans fil, nous utilisons différentes techniques dans le but de réduire la consommation d'énergie, notamment : Energie de capteur, Energie de calcul, Energie de communication. Pour donner une vue globale on résume les techniques de conservation d'énergie dans le schéma suivant :

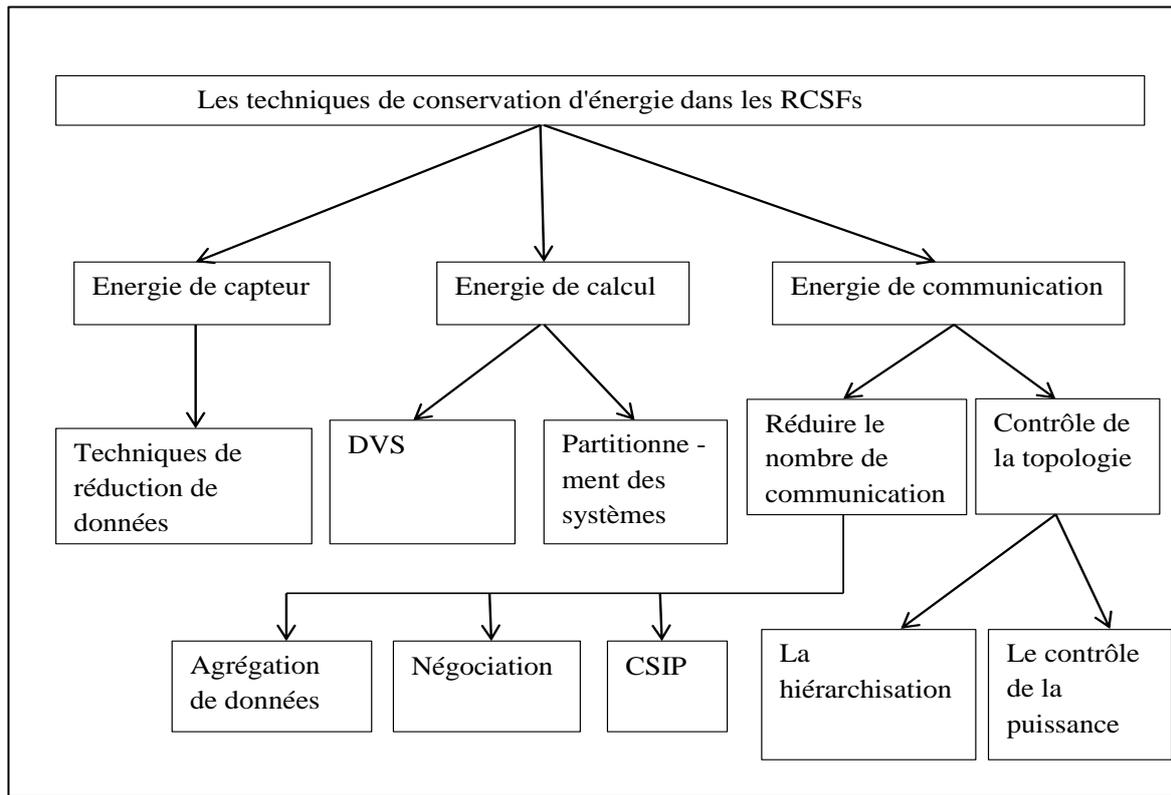


Figure 2.2 : Les techniques utilisées pour minimiser la consommation d'énergie [54].

Peut-être économisée l'énergie de capteur soit :

- a. Au niveau de capteur, Afin de minimiser la consommation d'énergie, nous n'avons qu'une seule solution qui, c'est consister à réduire les durées de captures.
- b. Au niveau de traitement, l'énergie de calcul peut être optimisée avec deux techniques:
 - L'approche DVS (Dynamique Voltage Scaling) [31], qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence de microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
 - L'approche de partitionnement de système [32], qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul.
- c. Au niveau de la communication, la minimisation de la consommation énergétique lors de la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la couche MAC. Ces protocoles reposent sur de multiples technologies : agrégation de données, négociation et CSIP (Cooperative Signaling and Information Processing).

Cette technologie est une discipline qui combine de multiples domaines [33] : la communication et le calcul basse consommation, le traitement du signal, les algorithmes distribués et la tolérance aux pannes,

les systèmes adaptatifs, et la théorie de la fusion des capteurs et de la prise de décision. Le but de ces techniques est de réduire le nombre de messages envoyés/reçus.

D'autre part, le contrôle de la topologie [32] permet d'ajuster la puissance de transmission et le regroupement (priorité) des nœuds capteurs.

- Le contrôle de la puissance de transmission n'affectera pas seulement la durée de vie de la batterie du nœud de capteur, mais aussi sur la capacité de charge du trafic qui est caractérisée par le nombre de paquets de données transmis avec succès à la destination. De plus, cela affecte également la connectivité et la gestion de la densité (le nombre de nœuds voisins). Par conséquent, il peut économiser de l'énergie à deux niveaux : explicitement en appliquant une faible puissance d'émission et implicitement en réduisant les conflits avec d'autres nœuds émetteurs.
- La hiérarchisation consiste à organiser le réseau en plusieurs niveaux de structure. C'est par exemple le cas des algorithmes de groupement (clustering), qui organisent le réseau en groupes (clusters) avec des chefs de groupe (cluster head) et des nœuds membres [34].

2.8. Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteurs est dépendue principalement de la consommation d'énergie. Nous avons présenté dans ce chapitre quelques techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans le chapitre suivant, nous parlerons des routages qui sont considérées comme l'une de ces techniques.

Chapitre 3

Protocoles du routage dans les RCSFs

Sommaire

- 3.1. Introduction**
- 3.2. Routages dans les RCSF**
- 3.3. Routage**
- 3.4. Protocoles de routage**
- 3.5. Classification des protocoles de routage**
- 3.6. Travaux liés**
- 3.7. Conclusion**

3.1. Introduction

Dans les RCSF, un grand nombre de capteurs sont déployés pour surveiller un phénomène et remonter les informations au centre de contrôle à distance. Pour cela, les capteurs ont la capacité de communiquer et de coopérer entre eux, d'envoyer les informations collectées à la station de base, de garantir sa fiabilité, et d'emprunter le chemin le plus court entre la station de base et le nœud qui détecte ce phénomène. Cette opération permet le routage d'informations entre nœud détecteur et le nœud puis, et il s'agit alors de trouver le chemin le plus court. Dans cette optique, plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature. [31]

Les protocoles de routage conçus pour RCSF doivent garantir le routage des informations avec le coût énergétique le plus bas entre n'importe quel nœud du réseau et la station de base.

Dans ce chapitre, nous présentons le concept de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous commencerons par une définition de routage, ainsi les classifications des protocoles de routage.

3.2. Routages dans les RCSF

Le routage est l'une des fonctions les plus importantes d'un réseau de communication qui permet aux nœuds de propager les données capturées entre la source et la destination. Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est généralement un routage multi-sauts. Le transfert d'informations de la source à la destination finale se fait via plusieurs nœuds intermédiaires. Par conséquent, un nœud consomme de l'énergie pour transmettre ses données ou relayer des données vers d'autres nœuds. Pour cela, la stratégie de routage doit prendre en compte la bonne gestion de l'énergie des nœuds capteurs, prolongeant ainsi la durée de vie du RCSF [55].

3.3. Routage

La technologie de routage est une méthode d'acheminement des données vers la bonne destination via un réseau de connexion donnée, le routage est un processus de choix d'un chemin dans le réseau pour transmettre les données. Le problème de routage au sein du RCSF est assez complexe, principalement en raison du manque d'infrastructures fixes (forêt, mer, ...) [32]. Le principal défi du routage est de déterminer le routage optimal des paquets à travers le réseau au sens de critères de performances spécifiques. En réalité, le problème est de trouver l'investissement le moins coûteux en capacité nominale et en réserves pour assurer l'acheminement du trafic nominal et garantir sa survie en cas de défaillance d'un ou plusieurs nœuds du réseau.

3.4. Protocole de routage

Les protocoles publiés dans le domaine RCSF ont été largement étudiés et peuvent être classés selon un certain nombre de critères. Dans cette section, les protocoles de routage sont classés en fonction de la structure du réseau.

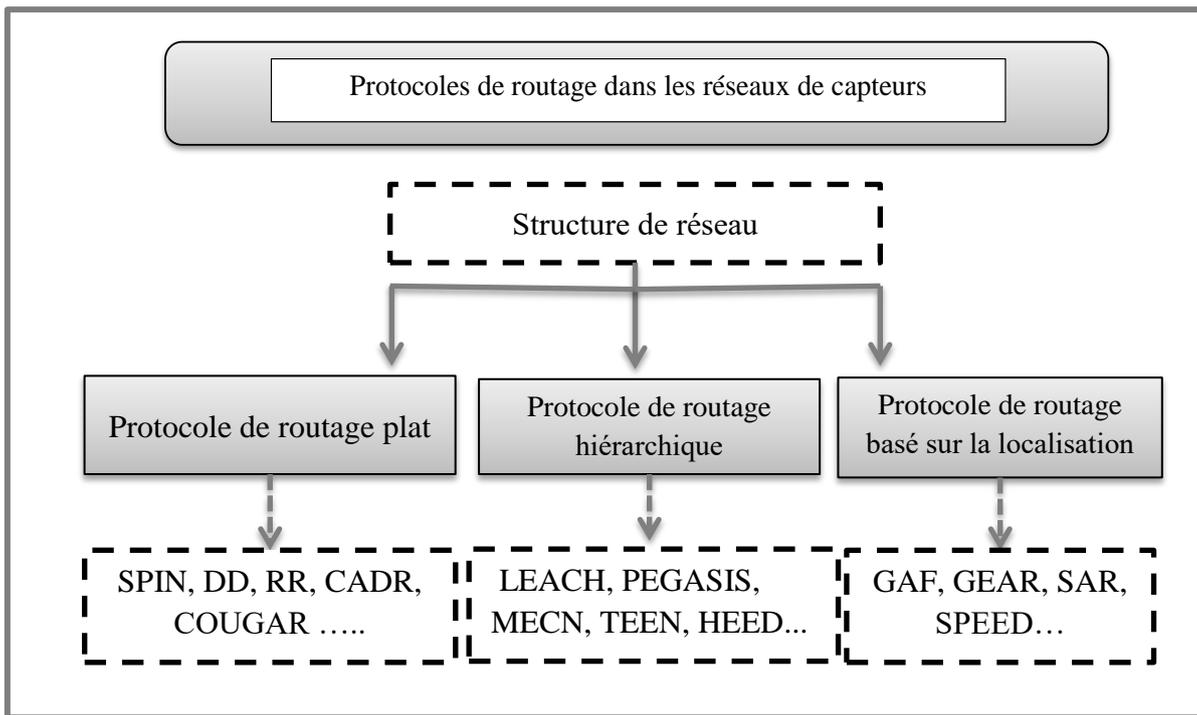


Figure 3.1: Principaux protocoles de routages dans les RCSF [56].

3.5. Classification des protocoles de routage

3.5.1. Classification selon la structure du réseau

Elle détermine l'organisation des capteurs dans le réseau, généralement ils peuvent être divisés en deux catégories de topologie :

3.5.1.1. Topologie plate

Dans un réseau plat, tous les nœuds de capteurs sont identiques et jouent le même rôle dans l'exécution des tâches de détection, sauf les nœuds puits (sink) qui est responsable collecter les informations des différents nœuds capteurs et transmettre vers l'utilisateur final.

En raison du grand nombre de nœuds, il est impossible d'attribuer un identifiant global à chaque nœud du réseau de capteurs. Pour cette raison, la collecte de données se fait généralement à l'aide d'un routage centré sur les données, où le collecteur de données envoie une requête par inondation à tous les nœuds et seuls les nœuds capteurs avec des données correspondant à la requête répondent au sink. Chaque capteur communique avec le sink via un chemin multi-sauts [33].

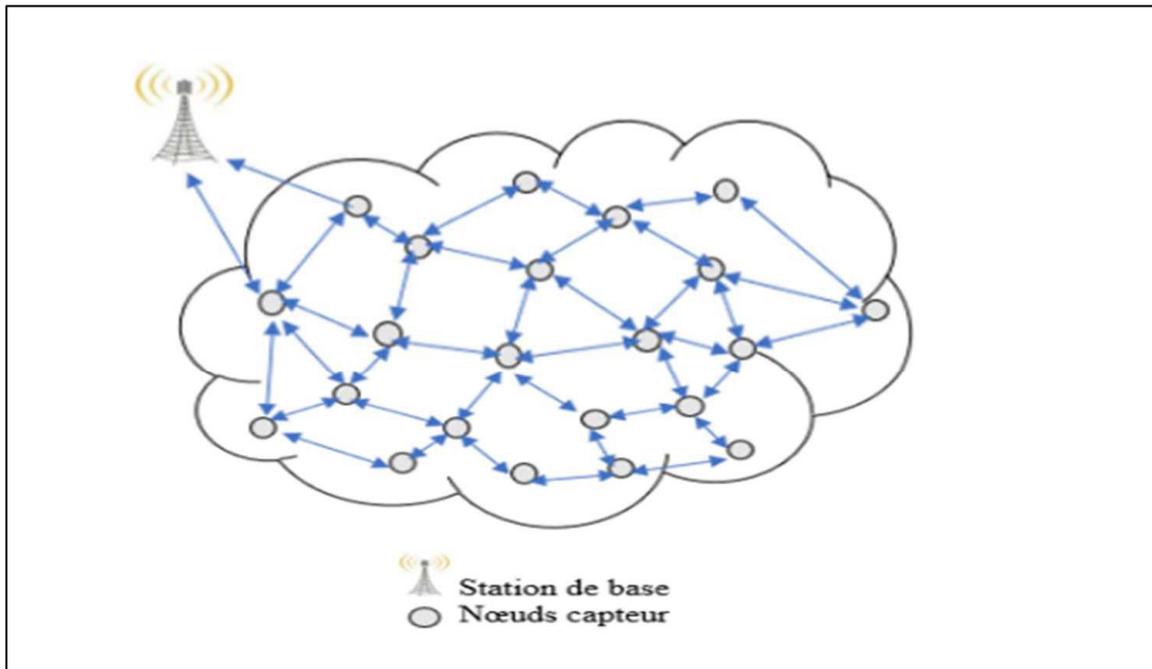


Figure 3.2: Topologie plate.

3.5.1.2. Topologie hiérarchique

L'objectif principal du routage hiérarchique est de maintenir efficacement la consommation d'énergie des nœuds de capteurs. Dans la structure hiérarchique, le Clustering est l'une des méthodes les plus couramment utilisées. Cela implique de diviser le réseau en groupes appelés clusters. Un cluster se compose d'un chef (cluster Head) et de ses membres. Dans une approche hiérarchique, il est plus facile d'intégrer des mécanismes d'agrégation dans le système, en effectuant l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination [33]. Les nœuds membres transmettent leurs données au cluster Head, qui agrège ensuite ces lectures pour transmettre le résumé à la station de base [34]. L'inconvénient de cette approche est la surcharge du cluster Head, entraînant une consommation d'énergie déséquilibrée sur le réseau. Pour y remédier, les clusters Head considérer comme des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacité de traitement, qui peuvent être sélectionnés en fonction de leur capacité énergétique et doivent être élus périodiquement.

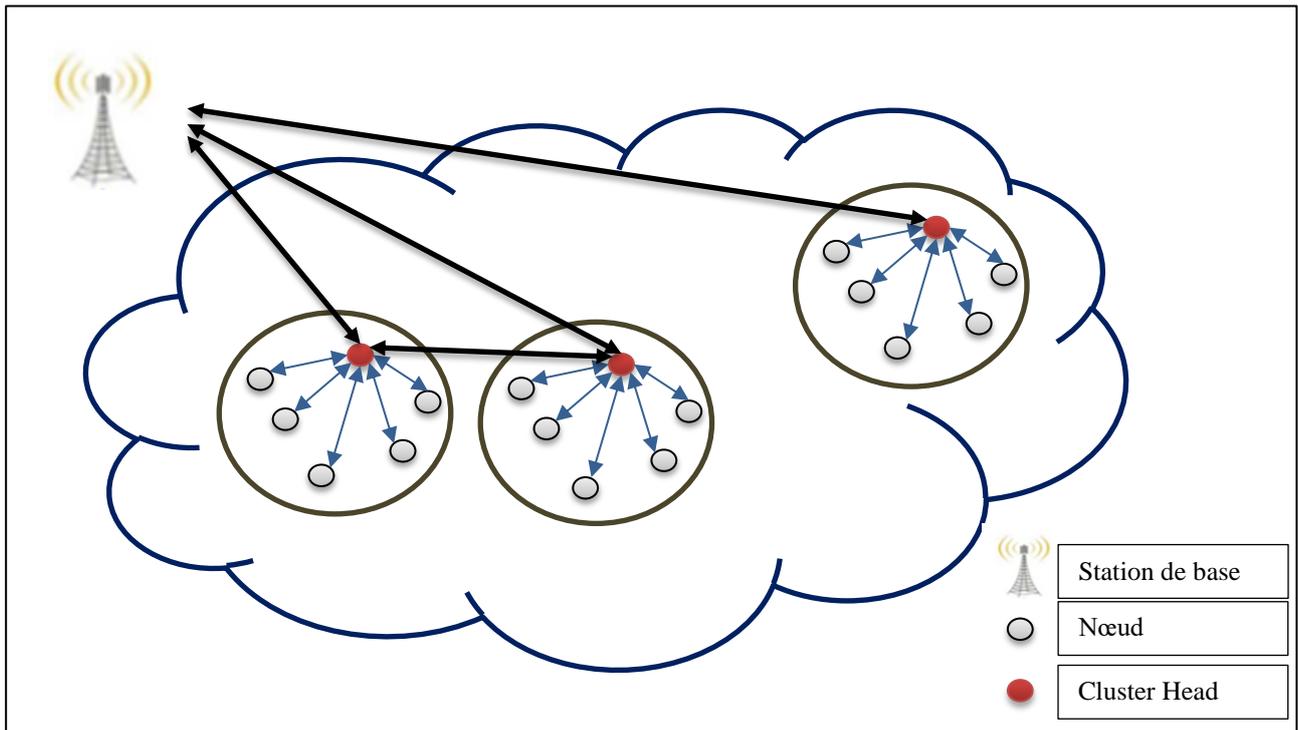


Figure 3.2: Topologie hiérarchique.

3.5.1.2.1. Les approches de routage hiérarchique

Les protocoles de routage hiérarchique peuvent être divisés en deux grandes approches : une approche basée sur le cluster et une approche basée sur la chaîne [42].

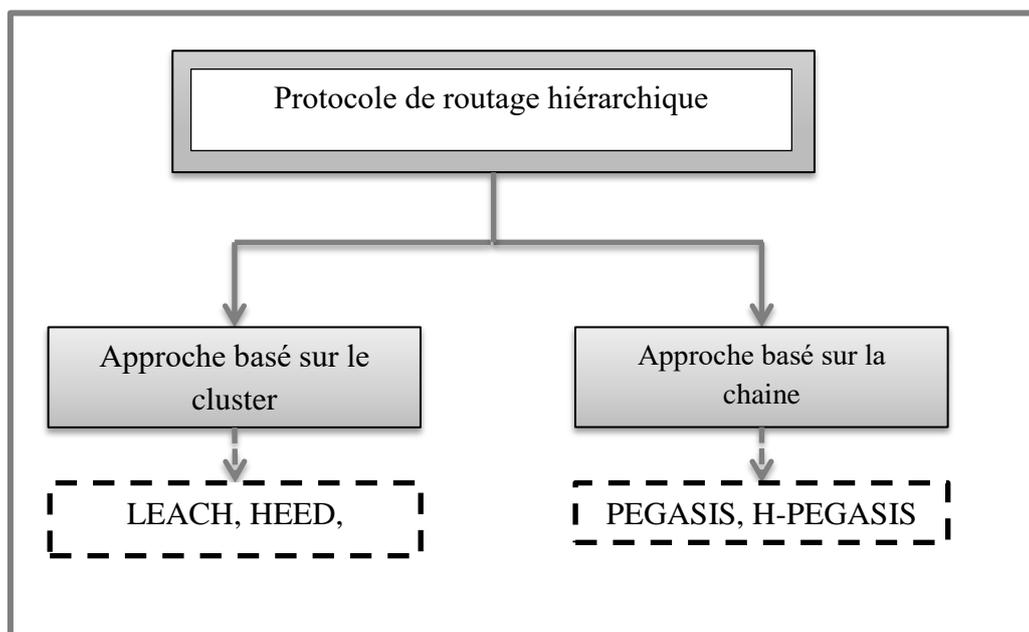


Figure 3.3: Les approches dans le protocole de routage hiérarchique.

a. Approche basée sur le cluster

Dans cette approche, le réseau est divisé en clusters, où choisissent un seul capteur dans chacun des clusters pour être le chef de groupe. La formation de cluster et la sélection du chef de cluster sont importantes pour les protocoles de routage hiérarchique. De plus, chaque chef de cluster crée un plan de transmission pour les capteurs de son cluster.

Exemples : LEACH, HEED....

– **Protocol HEED (Hybrid, Energy-Efficient, Distributed approach)**

HEED est un protocole de routage conçu pour les réseaux de capteur sans fil proposé par O. YOUNIS et Fahmy [35]. Il est basé sur un algorithme de clustering distribué. HEED ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille, mais il suppose que les capteurs sont intelligents, ce qui signifie qu'ils ont le potentiel de modifier leur puissance de transmission. HEED sélectionne périodiquement les chefs de cluster (Cluster Head) en fonction de deux paramètres : l'énergie résiduelle de chaque nœud et d'un paramètre secondaire, le "coût de communication" intracluster tel que le degré du nœud ou la proximité du nœud avec ses voisins. En fait, seuls les nœuds avec une énergie résiduelle importante peuvent devenir des chefs de groupe. Dans HEED, la probabilité CH_{Prob} qu'un nœud est élu comme chef de cluster est calculé par la formule suivante:

$$CH_{Prob} = C_{Prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (3.1)$$

Où C_{Prob} : pourcentage initial (seuil).

$E_{residual}$: L'énergie résiduelle actuelle estimée dans le nœud.

Et E_{max} est une énergie maximale de référence (correspondant à une batterie complètement chargée), qui est typiquement identique pour tous les nœuds.

Dans HEED, le chef de cluster communique directement avec la station de base, minimisant ainsi la consommation d'énergie. Et un nœud doit pouvoir communiquer directement avec son chef de cluster (via un seul saut).

Minimiser la probabilité que deux nœuds voisins deviennent des chefs en même temps permet à HEED de garantir une meilleure répartition des chefs de cluster sur le réseau. Cette probabilité peut être ajustée pour permettre des connexions entre n'importe quel chef de cluster. Typiquement, cet algorithme s'exécute en trois phases:

➤ **Initialisation**

Premièrement, l'algorithme commence à fixer un pourcentage initial de chefs de cluster parmi tous les nœuds, un seuil C_{Prob} qui utilise pour limiter les annonces initiales du chef de cluster. Tout nœud du réseau calcule sa probabilité CH_{Prob} pour devenir un Cluster Head (CH) avec la formule (3.1).

La probabilité CH_{prob} est toujours supérieure à un certain seuil p_{min} qui est sélectionné pour être inversement proportionnel à E_{max} .

➤ **La phase de répétition**

Chaque nœud s'attache avec un Cluster Head pour garantir des coûts de transmission minimale. Chaque nœud double ensuite son probabilité CH_{prob} à chaque itération jusqu'à ce qu'elle soit égale à 1. Si un nœud choisit de devenir un chef de cluster, il envoie un message d'annonce où le statut de sélection soit dans l'état "tentative " si $CH_{prob} < 1$, soit "état final" si $CH_{prob} = 1$. Un nœud se considère comme « couvert » s'il a entendu soit un tentative_CH, soit un final_CH. Si un nœud termine l'exécution de HEED sans sélectionner un chef de cluster qui est final_CH, il se considère comme non couvert et s'annonce comme un chef de cluster avec l'état final_CH [35].

➤ **La phase finale**

Dernièrement, chaque nœud définit explicitement son état. Il s'agit soit du membre du cluster avec le moindre cout, soit du cluster head. Bien que le protocole HEED soit conçu pour prolonger la durée de vie du réseau, il risque de générer un grand nombre de clusters heads. De plus, ce protocole HEED ne peut considérer que la communication directe entre le cluster head et la station de base. Par conséquent, les nœuds les plus éloignées consomment plus d'énergie.

Le clustering se termine dans un nombre fixe d'itérations (quel que soit le diamètre du réseau).

Communication Intercluster : Une fois le réseau mis en cluster, l'organisation intercluster dépend de l'application réseau. Par exemple, les chefs de cluster peuvent communiquer entre eux pour agréger leurs informations via plusieurs sauts. La communication multi-sauts est souvent utilisée pour une mise à l'échelle appropriée des réseaux hiérarchiques. Ce type de communication permet de réduire la consommation d'énergie en utilisant la transmission radio. Cela permet de minimiser les collisions en garantissant une meilleure qualité de réception des données [35].

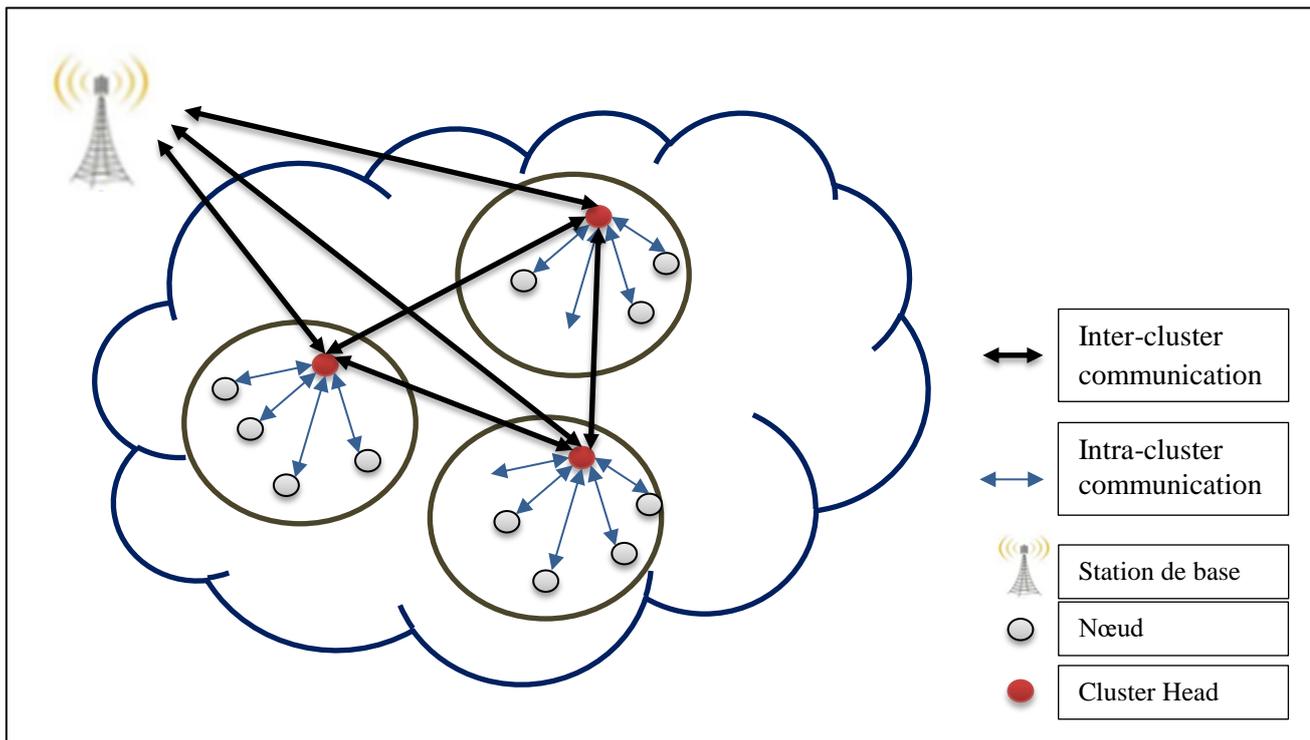


Figure 3.4: Architecture du routage hiérarchique HEED.

❖ **Avantages du protocole HEED**

- Équilibre de la taille des clusters.
- Prolonger la durée de vie du réseau en répartissant l'énergie du CH d'une façon uniforme.
- Utilisez deux paramètres importants lors de la sélection CH.

❖ **Inconvénients du protocole HEED**

- L'élection périodique des clusters heads nécessite d'une énergie supplémentaire pour reconstruire les clusters.
- La surcharge, car il faut de nombreuses itérations pour former un cluster.

b. Approche basée sur la chaîne

Dans cette approche, les nœuds seront organisés de manière à former une chaîne de voisins reliant tous les nœuds, puis choisir un chef de chaîne qui communique directement avec la station base, parmi les protocoles de routage PEGASIS, H-PEGASIS, etc.

3.5.1.3. Protocoles de routage basés sur la localisation

Les protocoles de routage basés sur la localisation utilisent des informations de localisation pour guider la découverte de routes et le transfert de données. Ils permettent une transmission directionnelle des informations, en évitant l'inondation d'informations à travers le réseau. Ainsi, le coût de contrôle de

l'algorithme est réduit et le routage est optimisé. De plus, la gestion du réseau devient simple grâce à la topologie du réseau basée sur les informations de localisation des nœuds [36].

L'inconvénient de ces protocoles de routage est que chaque nœud doit connaître la localisation des autres nœuds.

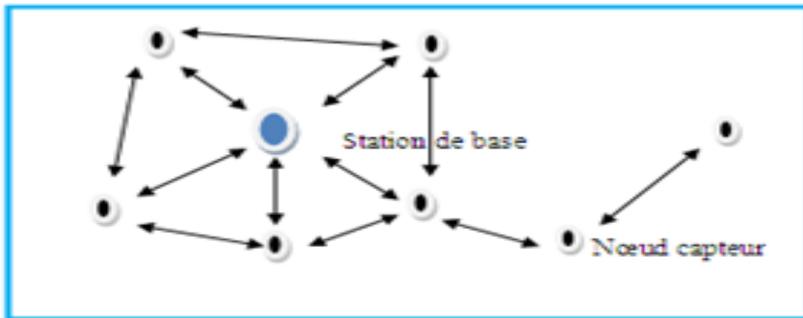


Figure 3.6: Topologie basé sur la localisation.

3.6. Travaux liés

HEED est un protocole de routage hiérarchique basé sur les clusters. De nombreux algorithmes de clustering basés sur HEED ont été développés pour les RCSFs. Dans cette section, nous allons présenter quelques travaux liés à ce sujet.

3.6.1. Algorithme de Routage Hiérarchique MHEED à Plusieurs Sauts (Multi-hop HEED) [37]

Naourez Mejiri et al. [37] ont choisi une adaptation de HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed Cluster). Ils ont adapté un protocole hiérarchique au routage multi-sauts effectué par les chefs de cluster, proposant deux variantes : MHEEDB, dans lequel le meilleur chemin est toujours utilisé, et MHEEDP, où chaque CH choisit son prochain relais parmi l'ensemble des CHs voisines. Le protocole proposé, appelé MHEED pour Multi-hop HEED, consiste en plusieurs tours de clustering successifs. Chaque tour comprend :

- Une phase d'agrégation (clustering) se déroule selon les mêmes principes décrits dans HEED. À la fin de cette phase, les CH sont élus et leurs clusters sont formés.
- Une phase de communication de données où le transfert de données se fait en deux étapes, les nœuds normaux transmettent périodiquement leurs données à leurs CHs. Et à la réception de ces données, chaque CH va agréger les données de ces membres pour minimiser le nombre de paquets à transmettre et envoyer les paquets agrégés à la SB. Ce transfert se produit de relais à relais via des CHs relais prédéterminé, comme suit :

Dans la première variante MHEEDB, chaque CH va garder un seul relais parmi les CHs voisines (meilleur en termes de métriques utilisées).

Dans la deuxième variante MHEEDP, chaque CH va garder plusieurs relais vers la SB parmi les CHs voisines. À chaque transfert de données, il choisit l'un d'entre eux (de façon probabiliste) pour transmettre soit ses données, soit des données reçues d'autres chefs plus éloignés qui le choisissent comme relais.

À la fin de chaque tour de clustering, le processus de clustering est déclenché de nouveau. Des nouveaux CHs sont élus. Et parmi ces derniers, de nouveaux relais sont recherchés pour acheminer les données.

Le choix de relais se base sur deux métriques principales : le Coût dans lequel, utilisé pour déterminer les meilleurs nœuds pour le routage des données. La 2ème métrique noté $Dist_BS$ utilisé pour estimer la distance entre le cluster head et la station de base. Dépend de la force du signal et connaissant la portée utilisée.

Selon le paramètre dist-BS, le chef de cluster ne transmet ces messages que si ses émetteurs sont plus proches qu'eux de la station de base. À la réception du message de découverte, le coût total du chemin est met à jour par le chef de cluster CHj.

$$C_{CHi,CHj} = cout(CHi) + \frac{E_{residuelle}}{E_{initiale}} \quad (3.2)$$

Si MHEEDB est utilisé, après avoir reçu le message de découverte CHi, CHj compare $C_{CHi,CHj}$ avec le meilleur_cout qu'il a déjà. Mettre à jour si ce coût est inférieur à meilleur_cout La valeur de ce champ traite ainsi l'expéditeur de ce message comme son prochain relais, sinon le message est rejeté.

Si MHEEDP est utilisé, après avoir calculé $C_{CHi,CHj}$ selon la formule (3.2), tous les CHs voisines sont ajoutées à la table relais RTj de la tête CHj.

La seconde approche est basée sur l'utilisation de probabilités pour choisir des chemins. Ainsi, le le chef de cluster CHi va affecter une probabilité à chacun de ces chefs voisins dans sa table de relais RTj. Cette probabilité est inversement proportionnelle au coût. Chaque chef de cluster dispose alors de plusieurs chefs de cluster relais à travers lesquels les données peuvent être acheminées vers les stations de base. Une fois l'échange de messages de découverte terminé, le leader CHj calcule le coût moyen pour atteindre la station de base.

Dans cet article, les hypothèses retenues sont :

- Les nœuds sont distribués uniformément dans le réseau et ils sont fixes.
- Tous les capteurs collectent des données et desservent une unique station de base.
- Tous les capteurs (sauf la station de base) sont identiques et ont la même capacité (même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement des données).
- Nœuds ordinaires homogènes uniformément répartis dans le réseau.

La simulation commence par une phase d'agrégation (clustering), suivie d'une phase de recherche de relais, suivie de transferts de données quotidiens. Ce processus se poursuit périodiquement à chaque tour de d'agglomération. La simulation se termine lorsque l'énergie de tous les nœuds du réseau est épuisée.

Le résultat de simulation montre que le choix probabiliste des relais dans MHEEDP permet d'équilibrer la charge entre les différents CHs, offrant de meilleurs résultats en termes d'augmentation de la durée de vie du réseau et du taux de transfert de données [37].

3.6.2. A Novel HEED Protocol for Wireless Sensor Networks [38]

Dans cet article, les auteurs ont proposé un nouveau protocole HEED pour les réseaux de capteurs non uniforme en cluster pour prolonger la durée de vie du réseau. L'analyse des performances du HEED proposé et des différentes variantes du protocole HEED existant est effectuée en termes d'énergie dissipée, de mort du premier nœud, en termes de rayon de cluster et de nombre de nœuds actifs. Les résultats de la simulation montrent que le protocole HEED prévu à une durée de vie plus longue et est également plus économe en énergie que le protocole HEED existant.

Pour le choix des CHs parmi ' n ' nombres de nœuds, la distance moyenne de chaque nœud avec les autres nœuds du même cluster est obtenue par l'équation (3.3):

$$\varphi(n) = \frac{d_1+d_2+d_3+\dots+d_n}{n} \quad (3.3)$$

Où d_i est la distance entre deux nœuds de capteur voisins qui est calculée par la formule de distance euclidienne donnée dans l'équation (3.4).

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.4)$$

Où $(x_i - x_j)$ et $(y_i - y_j)$ sont les coordonnées des nœuds.

Dans cet article, les hypothèses proposées sont :

- Les nœuds capteurs du système sont immobiles.
- Les positions des nœuds de capteur ne sont pas informées, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas préparées via l'antenne GPS accomplie.
- Les nœuds capteurs ont des capacités de traitement et de communication parallèles et des conséquences identiques.
- Les nœuds de capteur sont négligés après le placement.

La sélection CH se fait principalement par l'énergie restante de chaque nœud de capteur.

Dans le protocole de routage H-HEED à deux niveaux, deux catégories de nœuds sont utilisées. L'un est les nœuds avancés et l'autre les nœuds normaux. La possibilité de nœud normal et de nœud avancé, ils ont renforcé la technique d'élection avec l'énergie résiduelle de nœuds spécifiques. La fonction de probabilité de nœud de membre normal est définie par l'équation (3.5)

$$P_{\text{normal}} = \frac{P_{\text{opt}}}{(1+\beta m)} \times \frac{E_{\text{residual}}}{E_0} \quad (3.5)$$

Où P_{opt} pourcentage optimal de CH et E_0 est l'énergie préliminaire des nœuds capteurs. De même, la fonction de probabilité de nœud de capteur avancé est définie par l'équation (3.6)

$$P_{\text{advance}} = \frac{P_{\text{opt}}}{(1+\beta m)} \times \frac{E_{\text{residual}}}{E_0} \times (1 + \beta) \quad (3.6)$$

La sélection de CH est définie par l'équation (3.7)

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(r \bmod 1/P)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.7)$$

Où

P est la proportion de choix des CH.

r est rond présent.

G est le groupe de tous les nœuds capteurs qui ne sont pas dans CHs en $1/P$ rounds.

À chaque tour, le nœud produit un nombre aléatoire appartenant à 0 et 1. Si le nombre aléatoire généré est inférieur à $T(n)$, alors sélectionné comme CH, sinon non.

Le résultat de simulation montre que le HEED proposé fonctionne bien par rapport au HEED et UHEED et que la dissipation d'énergie dans le HEED proposé est moindre par rapport aux variantes HEED existantes.

3.6.3. UHEED An Unequal Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks [39]

Dans cet article, Ever, E et al. [39] ont proposé un algorithme de clustering inégal pour un réseau de capteurs sans fil, basé sur le protocole HEED. Un algorithme de clustering inégal qui conduit à une énergie résiduelle plus uniforme dans le réseau et améliore la durée de vie du réseau. Un problème courant dans les clusters à base égale dans les réseaux de capteurs qui est le problème des points chauds. Dans ce papier, ils ont montré que le problème du point chaud existe réellement dans des clusters de taille égale (HEED), et ils ont tenté de l'atténuer en créant UHEED. Et ils tentent également de trouver la bonne taille de cluster basée sur la distance de la BS.

Le protocole proposé UHEED crée des clusters de taille inégale en fonction de la distance du CH à la BS. Plus le cluster head est éloigné de la BS, plus son rayon de compétition sera grand et par conséquent, la taille du

cluster sera plus grande par rapport aux clusters formés plus près de la BS. En créant des clusters de taille inégale, la quantité de trafic intra-cluster est considérablement réduite pour les CH les plus proches de la BS.

Dans la phase de transfert de données, chaque nœud du cluster transmet les données à CH qui, à son tour, transmet les données collectées à ses membres de manière multi-sauts (CH à CH) jusqu'à ce que la station de base (BS) soit atteinte. Le problème est que les nœuds plus proches de la BS manquent d'énergie plus rapidement que les nœuds plus éloignés. Un trafic inter-cluster excessif à proximité de la BS provoque la mort prématurée des nœuds voisins, ce qui réduit la durée de vie globale du réseau.

Dans UHEED, ils tentent de résoudre le problème des nœuds plus proches de la BS qui meurent plus tôt. Cet algorithme utilise une formule de rayon de compétition qui crée des clusters inégaux, car ils sont plus éloignés de la station de base. Cela permet moins de trafic intra-cluster pour les CH proches de la BS et donc plus d'énergie est allouée à la charge inévitablement plus élevée du trafic de relais, donc moins de communication intra-cluster pour les CH plus proches de la SB, empêchant ainsi leur mort prématurée.

Dans cet article, les hypothèses adoptées sont :

- Tous les nœuds sont homogènes en termes de capacités d'énergie, de communication et de traitement;
- Chaque nœud est identifié avec un identifiant unique;
- Les nœuds peuvent transmettre à différents niveaux de puissance en fonction de la distance des récepteurs;
- Les nœuds ne sont pas mobiles qu'ils restent immobiles après le processus de déploiement uniformément distribué;
- Les nœuds de communication peuvent établir la distance entre eux;
- Tous les nœuds connaissent leur distance de la station de base.

Ever, E et al. [39] ont utilisé un modèle de réseau similaire à HEED composé de plusieurs tours. Un tour commence par déclencher le mécanisme de clustering et après la formation des clusters, le réseau entre dans une phase d'échange de données. Cela inclut la communication intra-cluster où chaque nœud de capteur envoie exactement un message à son CH et la communication inter-cluster où chaque donnée agrégée est envoyée par le CH à la BS (la transmission de données multi-sauts entre les CHs est effectuée). Le tour se termine lorsque toutes les données agrégées envoyées par les CHs sont reçues à la SB.

UHEED utilise la formule de rayon de compétition :

$$R_{comp} = \left(1 - c \left(\frac{d_{max} - d(s_i, BS)}{d_{max} - d_{min}} \right) \right) R_{comp}^0 \quad (3.8)$$

Afin de créer des clusters inégaux. Étant donné que la durée de vie des CHs plus proches de la BS est plus critique, les clusters plus éloignés ont des tailles plus grandes par rapport aux clusters proches de la BS.

R_{comp}^0 est le rayon maximum de compétition. Dans ce travail, il est défini comme la distance diagonale de la zone de réseau de capteurs divisée par 10. d_{max} , d_{min} sont la distance maximale et minimale entre les nœuds de capteur et la station de base ; c est un coefficient constant compris entre 0 et 1.

Le résultat de la simulation a démontré que la durée de vie du réseau dans l'algorithme UHEED était augmentée dans tous les scénarios de test par rapport à HEED, LEACH et Unequal LEACH. Une étude intéressante a également été menée concernant la valeur de la constante c dans la formule du rayon de compétition. Les résultats de la simulation ont montré qu'une valeur de $c = 0.8$ a permis d'obtenir jusqu'à près de 250 % d'amélioration de la durée de vie du réseau par rapport à HEED et une amélioration de près de 100 % par rapport à une LEACH inégale. Au cours de cette enquête, ils ont découvert que des valeurs telles que le premier nœud mort (FND), le demi-nœud vivant (HNA) et le dernier nœud mort (LND) sont quelque peu affectées par la densité du réseau.

3.6.4. Congestion Control in Wireless Sensor Network using HEED Protocol [40]

Cet article utilise une logique floue et une approche non probabiliste des élections CH pour améliorer le protocole HEED. Pour élire les CH, le protocole utilise l'énergie restante du nœud. En revanche, le modèle probabiliste HEED pour le choix des CH tentative est éliminé en introduisant des retards pour chaque nœud, inversement proportionnels à l'énergie résiduelle du nœud. Les CH provisoires sont donc sélectionnés sur la base de la priorité. Ils effectuent la comparaison de leur approche avec le protocole LEACH (Energy Adaptive Clustering Hierarchy).

Heterogeneous –HEED (H-HEED) est le type adapté de protocole HEED par ordre de non-uniformité. Dans lequel le CH est désigné par une partie de l'énergie résiduelle à l'énergie supérieure influencée par les nœuds. Il communique directement et des systèmes lissés d'énergie différents ont été générés.

La condition de validation appliquée au réseau est :

- Les nœuds capteurs du système sont immobiles.
- Les positions des nœuds de capteur ne sont pas informées, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas préparées via l'antenne GPS accomplie.
- Les nœuds capteurs ont des capacités de traitement et de communication parallèles et des conséquences identiques.
- Les nœuds de capteur sont négligés après le placement.

Dans le protocole proposé, ils supposent que le système est de nature différente, où le total $m\%$ de nœud avancé a un facteur d'énergie supplémentaire dans celui-ci tout en étant assimilé à des nœuds normaux.

Supposons que chaque nœud de capteur ait une énergie initiale E_0 . L'énergie du avancé dans le proposé est $E_0(1 + \beta)$. L'énergie totale du réseau projeté est calculée par l'équation (3.9)

$$N E_0(1 + m\beta) = nm(1 + \beta) + N(1 - m) E_0 \quad (3.9)$$

En conséquence, l'énergie globale est amplifiée par un facteur $(1 + \beta m)$ fois. Selon la possibilité de nœud normal et de nœud avancé, ils ont renforcé la technique d'élection avec l'énergie résiduelle de nœuds spécifiques. La fonction de probabilité de nœud de membre normal est définie par l'équation (3.10)

$$P_{\text{normal}} = \frac{P_{\text{opt}}}{(1 + \beta m)} \times \frac{E_{\text{residual}}}{E_0} \quad (3.10)$$

Où P_{opt} pourcentage optimal de CH et E_0 est l'énergie préliminaire des nœuds capteurs. De même, la fonction de probabilité de nœud de capteur avancé est définie par l'équation (3.11)

$$P_{\text{advance}} = \frac{P_{\text{opt}}}{(1 + \beta m)} \times \frac{E_{\text{residual}}}{E_0} \times (1 + \beta) \quad (3.11)$$

La sélection de CH est définie par l'équation (3.12)

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/P)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

Où

P est la proportion de choix des CH.

r est rond présent.

G est le groupe de tous les nœuds capteurs qui ne sont pas dans CHs en $1/P$ rounds.

À chaque tour, le nœud produit un nombre aléatoire appartenant à 0 et 1. Si le nombre aléatoire généré est inférieur à $T(n)$, alors sélectionné comme CH, sinon non.

Dans cet article, ils comparent deux protocoles différents, LEACH et HEED. Ils se dirigent vers des applications qui nécessitent une évolutivité, une durée de vie prolongée du réseau et les nœuds sont dispersés dans un grand champ spacieux. Ils considèrent un réseau quasi-stationnaire dans lequel les nœuds ne connaissent pas l'emplacement et ont une importance égale. La caractéristique la plus précieuse de cette approche est que les nœuds doivent prendre en charge une puissance de transmission variable. Sur cette hypothèse, ils ont présenté le protocole HEED, où le processus de sélection du Cluster Head (CH) se termine après un nombre constant d'itérations. Cela ne dépend pas du diamètre du réseau. L'approche non probabiliste est effectuée en attribuant un « temps de retard », inversement proportionnel à l'énergie du nœud, à chaque nœud. Par quoi diminuer le temps de retard et également réduire le problème de congestion.

Le résultat de la simulation montre que le protocole HEED donne de meilleures performances que LEACH. Le HEED proposé fonctionne bien par rapport au la variante existante du protocole LEACH en termes d'énergie dissipée, le premier nœud meurt par rapport au rayon du cluster et au nombre de nœuds vivants.

3.6.5. A novel clustering protocol ER-HEED [41]

Dans cet article, ils effectuent une étude comparative des protocoles de clustering basés sur HEED qui sont HEED, UHEED, RUHEED et un nouveau protocole de clustering ER-HEED qui est une variante de R-HEED. RUHEED améliore UHEED avec l'introduction de la rotation. RUHEED est composée de trois phases qui sont : l'élection du cluster head, la formation des clusters et une rotation. Dans la phase d'élections du CH, est utilisé l'algorithme HEED. Dans la phase de formation des clusters, la formule de rayon de la compétition est utilisée. Dans la phase de rotation, le CH curent désigner l'un de ses membres de ses clusters comme nouveau CH sans effectuer de protocole d'élection. Le nouveau CH est sélectionné en fonction de l'énergie résiduelle la plus élevée. La phase de rotation est effectuée jusqu'à ce que l'un des nœuds épuise complètement son énergie. Lorsque cela se produit, les BS informeront tous les nœuds d'exécution d'une nouvelle élection du cluster head et une d'une nouvelle phase de formation du cluster. L'avantage de RUHEED est de réduire le nombre de phases élections du cluster head et de formation du cluster, réduisant ainsi le nombre de messages de contrôle. Le nouveau protocole Energy based Rotated HEED (ER-HEED) améliore HEED avec l'introduction de la rotation dans des clusters de taille égale. ER-HEED est composé des phases suivantes :

- Élection du cluster head et formation du cluster : l'élection du cluster head et la formation du cluster sont effectuées selon le protocole HEED ;
- Phase de rotation : le CH actuel désigne le membre du cluster avec l'énergie la plus élevée comme le nouveau CH sans qu'il soit nécessaire d'effectuer un quelconque protocole d'élection ;
- Lorsque l'un des nœuds meurt, le re-clustering est effectué en répétant l'étape 1.

La rotation du rôle CH dans des clusters de taille égale réduit le nombre de phases d'élection de clustering HEED. On suppose que chaque paquet de données reçu par le CH contient des informations énergétiques de ses nœuds membres. Ceci est utilisé pour la phase de désignation.

Dans cet article, les hypothèses retenues sont :

- Tous les nœuds capteurs ont la même énergie initiale (homogène), mêmes capacités de communication et de traitement des données ;
- Chaque nœud capteur est identifié par un identifiant unique ;
- Les nœuds capteurs peuvent émettre à différents niveaux de puissance en fonction de la distance des récepteurs ;
- Les nœuds capteurs ne sont pas mobiles, c'est-à-dire qu'ils restent fixes ;
- Les nœuds capteurs sont également répartis sur le terrain et transmettent au même débit.

Les auteurs ont considéré le même modèle de réseau, le même modèle de consommation d'énergie et ils ont comparé LEACH, HEED, UHEED, RUHEED et ER-HEED en faisant varier la densité du réseau, la couverture des nœuds et la fréquence d'élection des CHs. Ils ont comparé ces algorithmes de clustering selon des définitions différentes de la durée de vie du réseau qui sont le premier nœud meurt et la moitié des nœuds meurt.

Les résultats de la simulation montrent que lorsque le premier nœud meurt, l'approche de clustering de taille égale basée sur la rotation (ER-HEED) est la plus économe en énergie. Lorsque la moitié de la durée de vie HND, l'approche de clustering RUHEED est l'approche la plus économe en énergie.

3.6.6. Comparaison entre les travaux liés

Tableau 4.1 : Comparaison entre les travaux liés.

Travaux Paramètres	[37]	[38]	[39]	[40]	[41]
type de Protocole /Algorithme	Algorithme de Routage hiérarchique à multi-sauts.	protocole Heterogeneous.	Algorithme de clustering inégal.	/	Algorithme de clustering de taille égale basée sur la rotation
Facteur utilisé	Le cout ; Dist_SB	/	rayon de compétition.	temps de retard.	/
Métriques d'évaluation	Durée de vie du réseau, débit idéal, débit maximal émis, débit effectif (reçu), taux de délivrance, Surcharge énergétique.	l'énergie dissipée, premier nœud mort par rapport au rayon du cluster, nombre des nœuds vivants.	Durée de vie du réseau, l'énergie résiduelle.	L'énergie consommée, temps de retard	L'énergie consommée , Le premier nœud mort, la moitié des nœuds morts, Les paquets de données reçus to SB.
Mobilité de SB	/	/	Non	\	Non
Nœuds	Homogènes, uniformément distribués, Fixes.	répartis au hasard, homogènes, Fixes.	les nœuds sont déployés au hasard après une distribution	Homogènes, Fixes.	Homogènes , Fixes.

			uniforme, homogènes.		
Critère de sélection des CHs	Selon le même principe décrit dans HEED. (Calculer la probabilité) Les clusters head sont sélectionnés périodiquement en fonction de deux paramètres. Énergie résiduelle et Coût de la communication intra-cluster.	Selon la possibilité de nœud normal et de nœud avancé, ils ont renforcé la technique d'élection avec l'énergie résiduelle de nœuds spécifiques.	Selon le même principe décrit dans HEED.	Une approche non probabiliste des élections CH. Pour élire les CH, le protocole utilise l'énergie restante du nœud.	Selon le même principe décrit dans HEED.
Nature du réseau	homogène	/	/	quasi-stationnaire	/
L'objectif	Au fur et à mesure que l'étendue du réseau augmente, le routage hiérarchique à saut unique devient incapable de garantir les données des nœuds distants aux stations de base. Cet article résoudre le problème du facteur d'échelle (scalabilité).	Prolonger la durée de vie du réseau,	Atténue le problème des points chauds, conduit à une énergie résiduelle plus uniforme sur le réseau et améliore la durée de vie du réseau.	Prolonger la durée de vie du réseau, diminuer le temps de retard et réduire le problème de congestion.	Prolonger la durée de vie du réseau.
Outil utilisé	/	MATLAB	/	MATLAB	/

Résultats obtenu	Le résultat de simulation montre que le choix probabiliste des relais dans MHEEDP permet d'équilibrer la charge entre les différents CHs, offrant de meilleurs résultats en termes d'augmentation de la durée de vie du réseau et du taux de transfert de données.	Le résultat de simulation montre que le HEED proposé fonctionne bien par rapport à la variante existante du protocole HEED en termes d'énergie dissipée, le premier nœud meurt en ce qui concerne le rayon du cluster et le nombre de nœuds vivants.	Le résultat de simulation indique que la durée de vie du réseau est considérablement améliorée par rapport à HEED et LEACH.	Le HEED proposé fonctionne bien par rapport au la variante existante du protocole LEACH en termes de durée de vie du réseau et également de formation de clusters, d'énergie dissipée, le premier nœud meurt par rapport au rayon du cluster et au nombre de nœuds actifs.	Lorsque le premier nœud meurt, (ER-HEED) est la plus économe en énergie. Lorsque La moitié des nœuds meurent HND, (RUHEED) est la plus économe en énergie.
Comparaison avec	/	HEED UHEED	HEED LEACH Unequal LEACH	HEED LEACH	HEED UHEED RUHEED LEACH

3.7. Conclusion

Plusieurs protocoles de routage ont été conçus pour RCSF qui donne des bons résultats en termes de temps nécessaire pour envoyer des informations à la station de base avec une consommation d'énergie moindre. Ces protocoles ont tous pour objectif commun d'assurer le routage des données collectées par les nœuds capteurs tout en prolongeant la durée du réseau.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les protocoles de routage et leurs classifications selon la structure du réseau. Parmi ces protocoles, nous avons étudié en détail le protocole HEED.

Chapitre 4

Contribution & Implémentation

Sommaire

- 4.1. Introduction**
- 4.2. Outils de développement**
- 4.3. Solution proposée**
- 4.4. Simulation**
- 4.5. Résultats & Analyse**
- 4.6. Conclusion**

4.1. Introduction

L'économie d'énergie est un défi majeur pour différentes applications dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, les sources d'énergie des capteurs sont très limitées et souvent irremplaçables. Les nœuds doivent donc utiliser leur énergie de manière optimale pour prolonger leur durée de vie.

Dans ce chapitre, nous présentons la partie implémentation de notre travail, puis nous détaillons notre contribution à la minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, et les résultats de simulation obtenus.

4.2. Outils de développement

MATLAB (MAtrix LABoratory) est un langage de script. Développé par Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, d'implémenter des algorithmes et de créer des interfaces utilisateur.

Nous avons choisi le langage de programmation MATLAB R2014a pour simuler et valider notre contribution pour plusieurs raisons :

- MATLAB est un langage de haut niveau pour le calcul scientifique et technique.
- MATLAB comprend des applications dédiées pour l'ajustement des courbes, la classification des données, l'analyse des signaux et de nombreuses autres tâches spécialisées.
- Graphiques pour la visualisation des données et outils conçus pour créer des tracés personnalisés.
- Les calculs et les affichages sont programmés infiniment vite.
- Outil qui permette la création d'applications avec des interfaces utilisateur personnalisées.
- MATLAB propose des boîtes à outils supplémentaires conçues pour répondre aux nombreux besoins spécifiques des ingénieurs et des scientifiques.
- Un environnement de bureau conçu pour l'exploration itérative, la conception et la résolution de problèmes.

Le tableau 4.1 suivant résume les caractéristiques de la machine utilisée pour simuler notre solution proposée :

Matériel	Caractéristiques
Processeur	Intel(R) Celeron(R) 2957U @ 1.40GHz 1.40 GHz.
Mémoire (RAM)	4.00 Go.
Système d'exploitations	Microsoft Windows 7 professionnel 64 bits.

Tableau 4. 1: Caractéristiques matérielles.

4.3. Solution proposée

Afin de minimiser la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, nous avons conçu une solution basée sur une architecture hiérarchique. Tout d'abord, nous introduisons le modèle de réseau. Ensuite, nous présentons le modèle d'énergie utilisé pour calculer l'énergie consommée dans les opérations de transmission et réception. Enfin, nous détaillons notre proposition de solution.

4.3.1. Modèle de réseau

Dans notre proposition, nous avons considéré un réseau de capteurs constitué de N nœuds sont distribués dans un espace de 2-dimensions avec une station de base fixe.

- Les nœuds sont fixes.
- Tous les nœuds (sauf la station de base) sont homogènes.
- Les nœuds capteurs sont organisés sous forme de clusters et chaque cluster a un chef nommé Cluster Head (CH).

4.3.2. Modèle d'énergie

Nous utilisons dans notre simulation le modèle énergétique introduit par A. Heinzelman et al. [43] les équations utilisées pour calculer les coûts de transmission et les coûts de réception pour un message de L bits et une distance d sont les suivantes :

Pour transmettre un message de L bits sur une distance d , l'émetteur consomme une quantité d'énergie $E_{TX}(L, d)$:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec}(L, d) + L * \varepsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \varepsilon_{mp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Pour recevoir un paquet de L bits, le récepteur consomme une quantité d'énergie $E_{RX}(L)$:

$$E_{RX}(L) = L * E_{elec} \quad (4.2)$$

Où

E_{elec} : L'énergie suffisante pour recevoir ou transmettre un seul bit.

ε_{fs} : Le facteur de l'amplification correspond au modèle (en espace libre).

ε_{mp} : Le facteur d'amplification correspond au modèle (multipath fading channel).

L : Représente la taille d'un message.

d : La distance entre l'émetteur et le récepteur.

d_0 : La distance limite pour laquelle les facteurs d'amplification changent de valeur. La distance d_0 est donnée par :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (4.3)$$

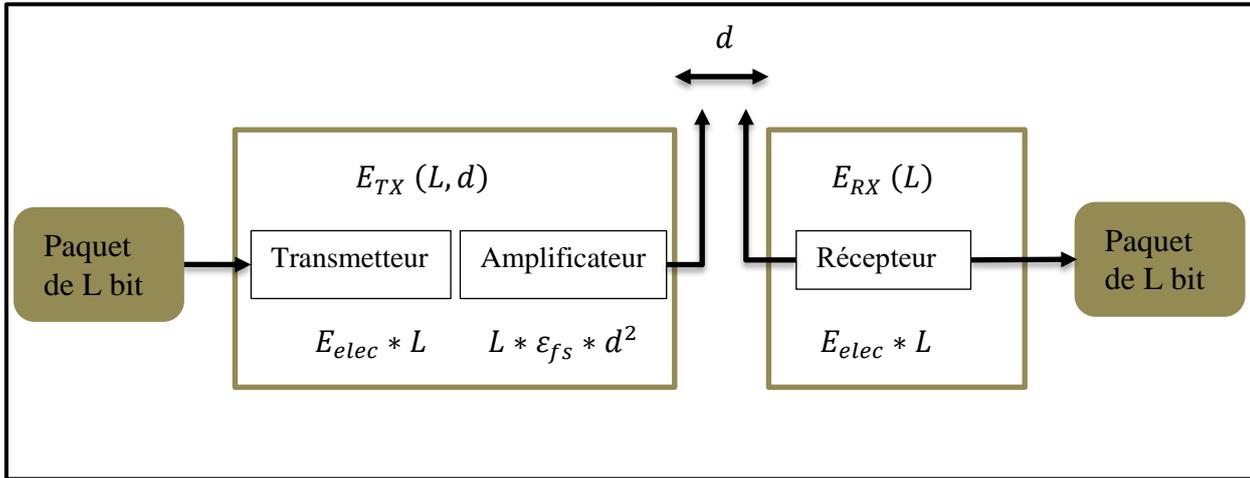


Figure 4. 1: Le modèle de l'énergie utilisé.

4.3.3. Les hypothèses

Les hypothèses adoptées sont les suivantes :

- Les nœuds sont distribués de manière aléatoire dans le réseau. Tous les capteurs collectent les données et servent une unique station de base.
- Les nœuds capteurs sont homogènes, c'est-à-dire, ils ont identiques et à capacité égale (même capacité de stockage et de traitement de données).
- Les nœuds de capteur sont négligés après le placement.
- Les capteurs sont ignorants de leurs emplacements géographiques (absence de système de localisation tel que GPS).
- Les nœuds peuvent jouer différents rôles : nœud ordinaire, nœud Cluster Head (CH), nœud de relais.
- La localisation des nœuds est supposée connue par la SB.

4.3.4. Description de la solution proposée

4.3.4.1. Phase initiale

Deux catégories de nœuds sont utilisées. L'un est les nœuds avancés et l'autre les nœuds normaux. Dans notre protocole proposé, en supposant que le réseau soit de nature différente, où le total $m\%$ de nœud avancé a un facteur d'énergie supplémentaire β dans celui-ci tout en étant assimilé à des nœuds normaux. Supposons que chaque nœud de capteur ait une énergie initiale E_0 . L'énergie du nœud de capteur avancé est $E_0(1 + \beta)$.

En conséquence, l'énergie globale est amplifiée par un facteur $(1 + \beta m)$ fois. Selon la possibilité d'un nœud normal et d'un nœud avancé, nous avons renforcé la technique d'élection avec l'énergie résiduelle de nœuds spécifiques. La fonction de probabilité F_p de nœud de membre normal est définie par l'équation:

$$P_{\text{normal}} = \frac{P_{\text{opt}}}{(1+\beta m)} \times \frac{E_{\text{residual}}}{E_0} \quad (4.4)$$

Où

P_{opt} : Le pourcentage optimal de CH.

E_0 : Énergie initiale.

La fonction de probabilité de nœud de capteur avancé est définie par l'équation:

$$P_{\text{advance}} = \frac{P_{\text{opt}}}{(1+\beta m)} \times \frac{E_{\text{residual}}}{E_0} \times (1 + \beta) \quad (4.5)$$

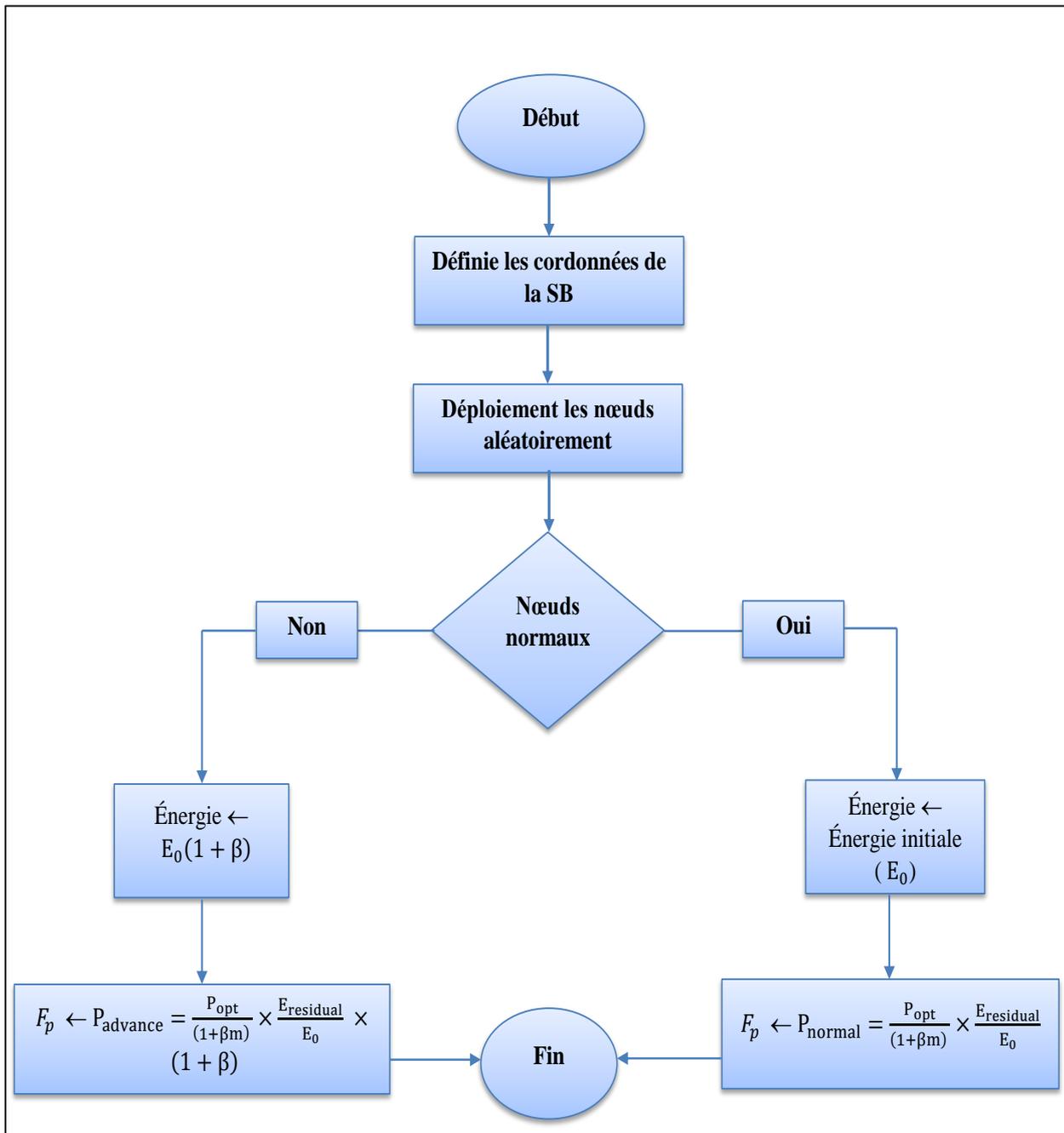


Figure 4. 2: Organigramme de la phase initiale.

4.3.4.2. Phase de construction

Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs (CHs). La sélection de CH est définie par l'équation :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/p)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec

P : Le pourcentage des nœuds désirant devenir CH.

r : Round courant.

G : Ensemble de nœuds n'ayant pas été élus CHs durant les $1/p$ tours.

Dans cette phase, chaque nœud n choisit un nombre aléatoire compris entre 0 et 1. Si le nombre aléatoire généré est inférieur à un seuil $T(n)$, le nœud devient un Cluster Head sinon non.

Chaque nœud qui s'est élu CH, il envoie un message d'annonce à tous ces voisins. Les nœuds décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu : le CH ayant le signal le plus fort est choisi (c.-à-d. Le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision.

À la fin de cette phase, les CH sont élus et leurs clusters sont formés.

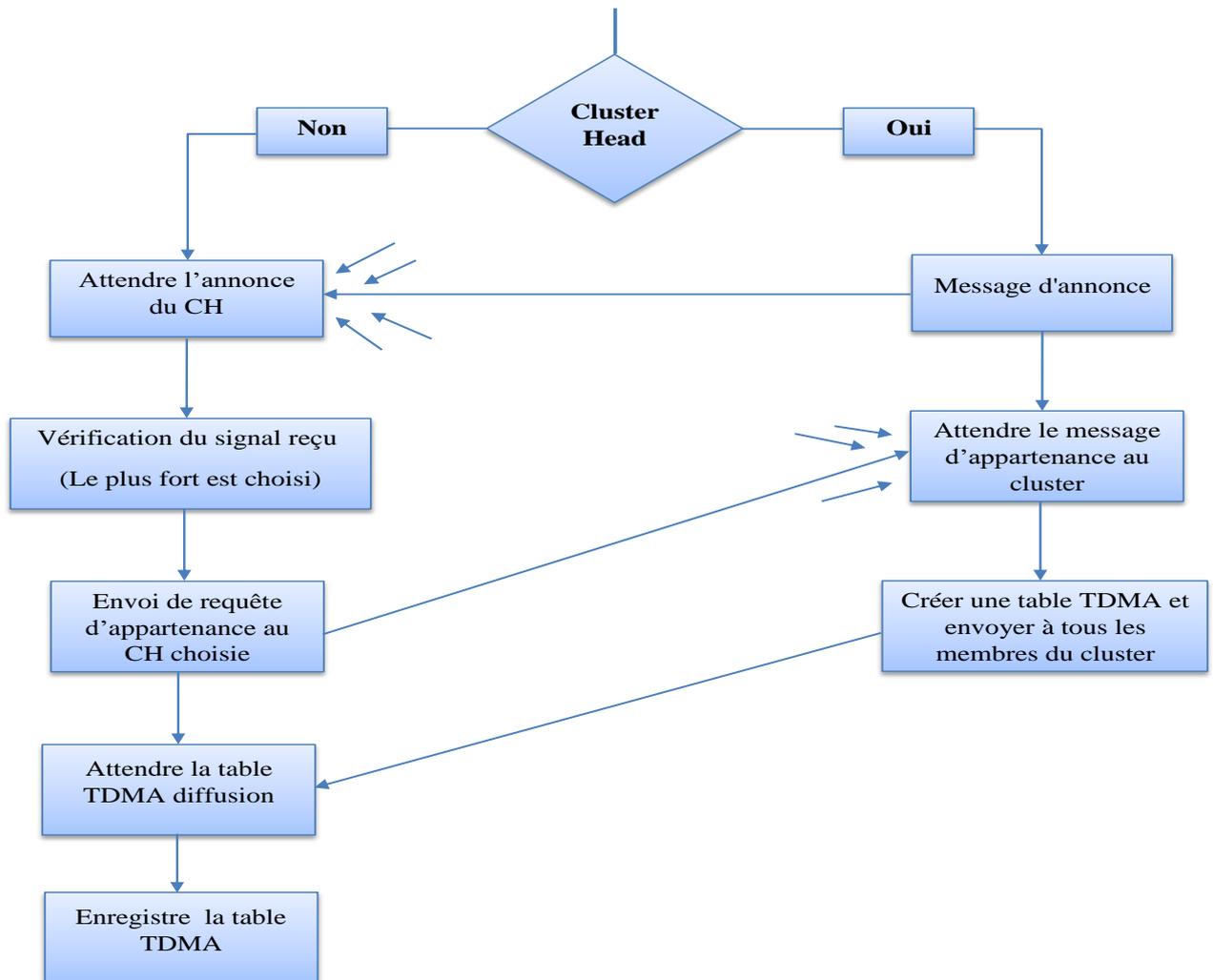


Figure 4. 3: Organigramme de la phase de construction.

4.3.4.3. Phase de communication

Dans la phase de communication des données où le transfert de données se fait en deux phases, les nœuds membres transmettent périodiquement leurs données à leurs CHs. Et à la réception de ces données,

chaque CH va agréger les données de ses membres pour minimiser le nombre de paquets à transmettre et envoyer les paquets agrégés à la SB.

Pour transmettre les données à la SB, dans notre protocole on a deux approches :

La première approche : Nommé MOD_HEED_WR (Modified Hybrid Energy Efficient Distributed Without Relais) dans lequel chaque CH transmette les données agrégées directement à la SB.

Remarque : Si la distance entre la SB et nœud membre est plus proche que la distance entre le nœud membre et le cluster (c'est-à-dire le CH), alors il envoie ses données directement à la SB.

La deuxième approche : Nommé MOD_HEED_R (Modified Hybrid Energy Efficient Distributed Relais) dans lequel le transfert des données se produit de relais à relais via des CHs relais prédéterminé, comme suit : Chaque CH va garder un relais vers la SB parmi les CHs voisines. À chaque transfert de données, il choisit l'un d'entre eux en fonction de distance (c'est-à-dire le plus proche) pour transmettre soit ses données, soit des données reçues d'autres chefs plus éloignés qui le choisissent comme relais. Ces relais forment une chaîne où le CH le plus éloigné est le nœud de départ (premier relais), lorsqu'on atteint le nombre du CH, le dernier relais transmette tous les données de la chaîne à la SB.

À la fin de chaque tour, le processus est déclenché de nouveau. Des nouveaux CHs sont élus. Et parmi ces derniers, de nouveaux relais sont recherchés pour acheminer les données.

a. Phase Intra-cluster communication

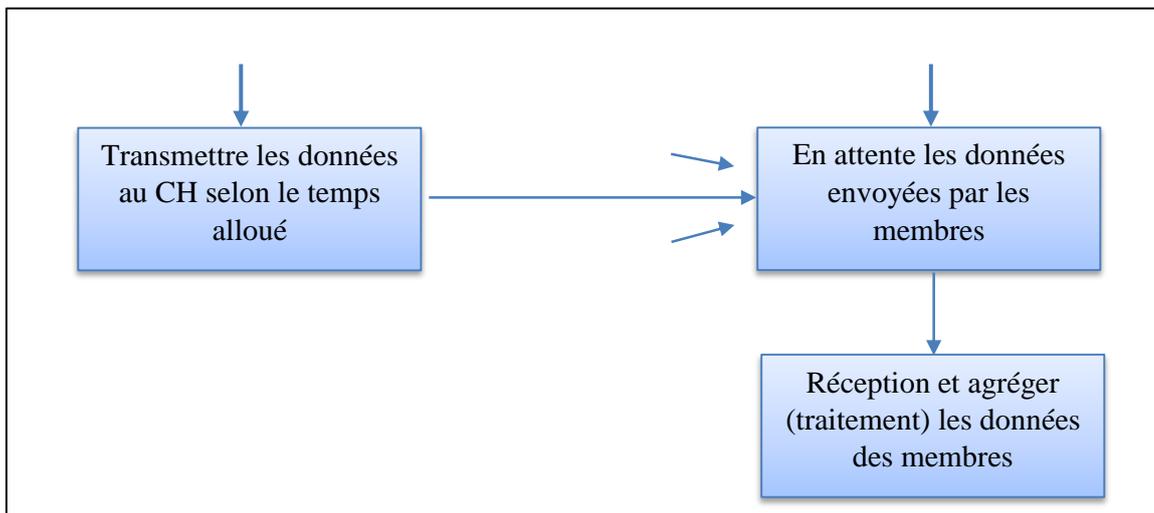


Figure 4. 4: Organigramme de phase Intra-cluster communication.

b. Phase Inter-cluster communication

Première approche

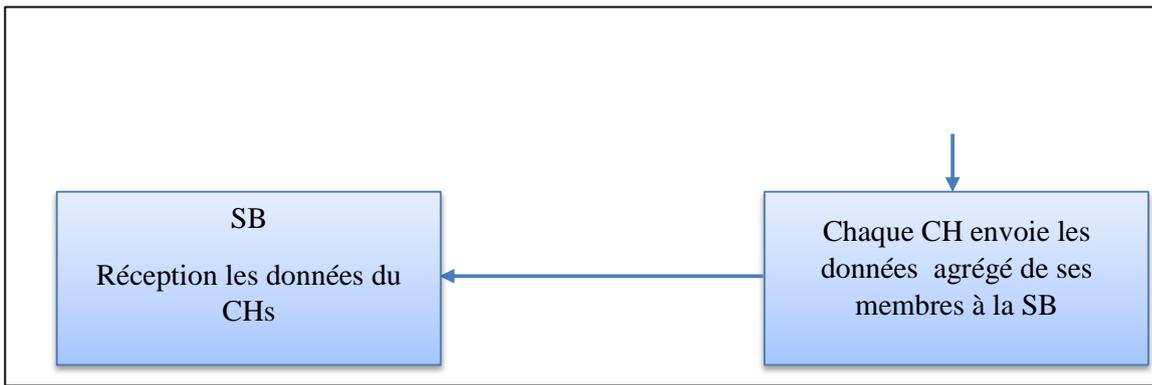


Figure 4. 5:

Organigramme de phase Inter-cluster communication (MOD_HEED_WR).

Deuxième approche

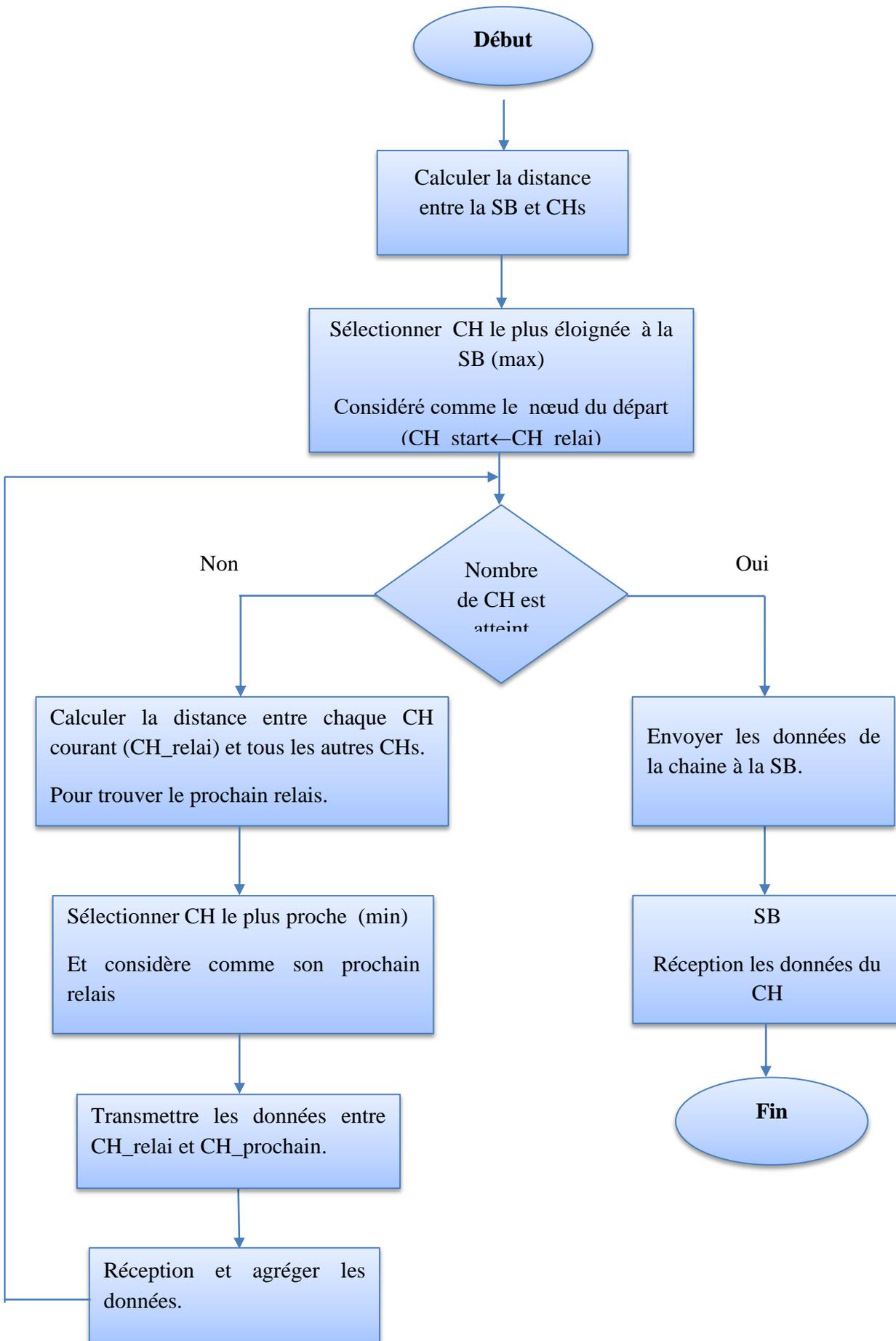


Figure 4. 6: Organigramme de phase Inter-cluster communication (MOD_HEED_R).

4.4. Simulation

Afin de démontrer la performance de notre solution, au début, nous allons décrire l’interface utilisée pour la simulation, après nous allons énumérer les paramètres de simulation et citer les différentes métriques d’évaluation. Puis, nous allons analyser et discuter les résultats obtenus de la simulation.

4.4.1. L’interface de simulation

Le simulateur se compose de trois parties principales : une partie des paramètres du réseau à gauche, une partie de la zone de simulation au milieu et une partie des résultats de la simulation à droite.

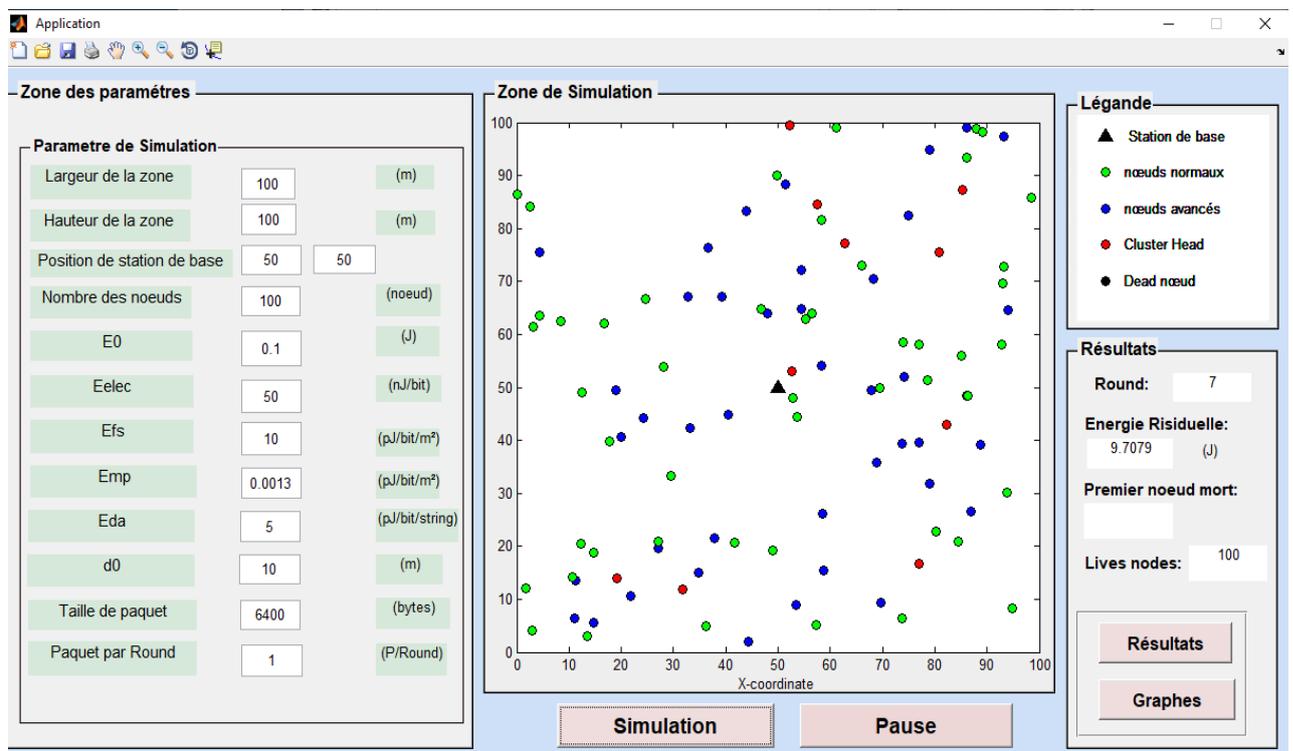


Figure 4. 7: l’interface de simulation.

a. Paramètres de simulation

La figure suivante résume les paramètres utilisés dans notre simulation. Les paramètres du réseau comprennent : la taille de la zone de simulation, la position de la station de base, le nombre des nœuds, les paramètres du modèle énergétique (énergie initiale E₀, E_{elec}, E_{fs}, E_{mp}, E_{da}), taille de paquet et le nombre de paquets à transmettre par Round.

Zone des paramètres

Parametre de Simulation

Largeur de la zone	100	(m)
Hauteur de la zone	100	(m)
Position de station de base	50	50
Nombre des noeuds	100	(noeud)
E0	0.1	(J)
Eelec	50	(nJ/bit)
Efs	10	(pJ/bit/m ²)
Emp	0.0013	(pJ/bit/m ²)
Eda	5	(pJ/bit/string)
d0	10	(m)
Taille de paquet	6400	(bytes)
Paquet par Round	1	(P/Round)

Figure 4. 8: Paramètre de simulation.

b. Zone de simulation

Cette zone se divise en trois parties :

La première partie représente la zone de simulation.

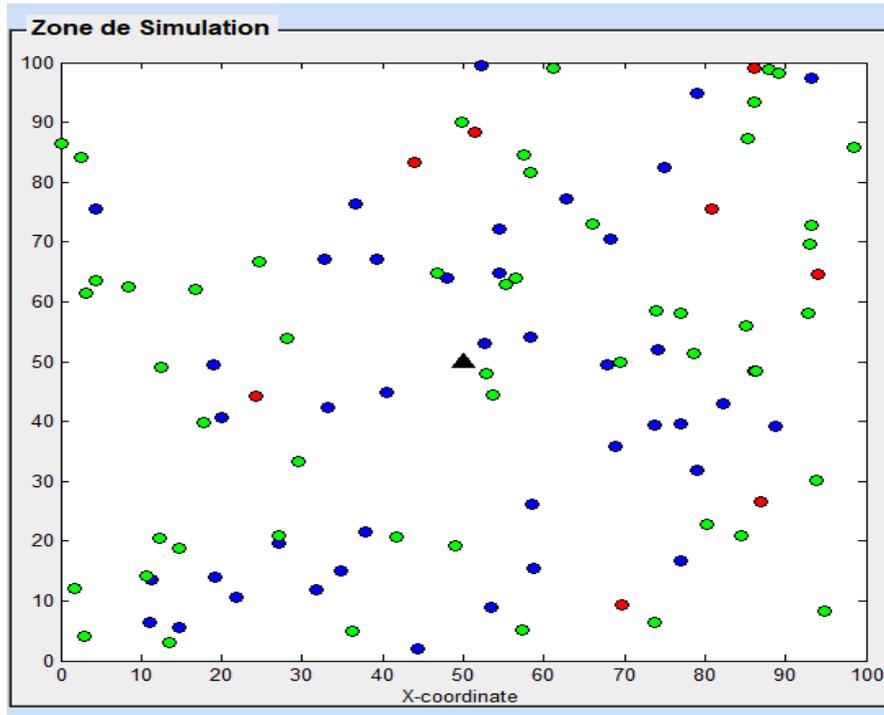


Figure 4. 9: la zone de simulation.

La deuxième partie se compose d’un bouton “Simulation” pour lancer la simulation, et d’un bouton "Pause" pour pauser la simulation.

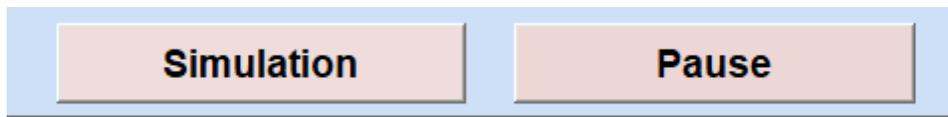


Figure 4. 10: Exécution.

La troisième partie représente la légende qui représente les composantes de la zone de simulation : la SB en noir, les nœuds normaux en vert, nœuds avancés en Blue, Cluster Head en rouge et les nœuds morts en noir.

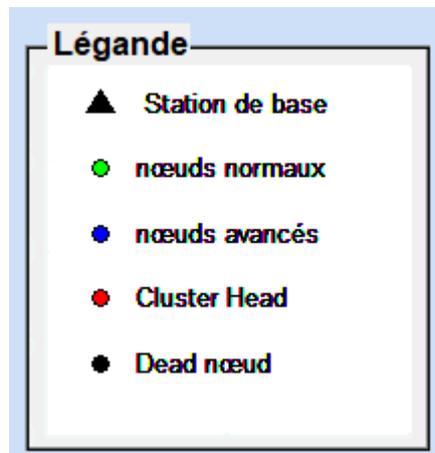


Figure 4. 11: légende.

c. Partie de résultats de simulation

Cette partie comprend :

- Résultats de la simulation : Round courante, Energie résiduelle, premier nœud mort, nombre des nœuds vivants.
- Bouton ‘Résultats’ pour afficher tous les résultats.
- Bouton ‘Graphes’ pour résumer les résultats sous forme des courbes.

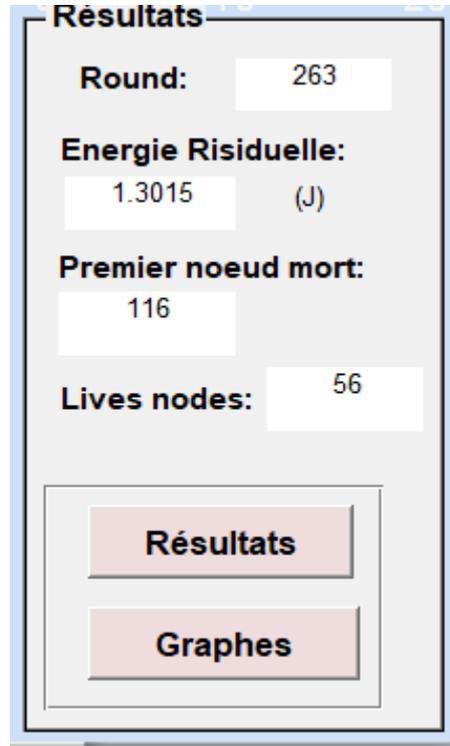


Figure 4. 12: Partie des résultats.

4.4.2. Métriques de simulation

Pour tester l'efficacité énergétique de notre protocole, nous avons considéré les métriques suivant:

- Durée de vie du réseau : la durée de vie du réseau en fonction du nombre d'itérations (Round) dans le premier nœud mort et les nœuds restant.
- Énergie résiduelle : définie comme la somme de l'énergie restante dans le réseau (c'est-à-dire l'énergie globale du réseau – l'énergie consommé).
- Le nombre de nœuds vivants (live nodes) par itération.
- Le nombre de nœuds morts (dead nodes).

4.5. Résultats & Analyse

Les nœuds sont déployés d'une manière aléatoire sur une interface de dimension $(100 \times 100) m^2$. Nous avons effectué plusieurs simulations (15 fois) sur notre protocole en utilisant les mêmes paramètres de simulation cité dans la figure 4.8, et d'autres paramètres qui sont :

Le total m% de nœud avancé = 20%.

β Facteur d'énergie supplémentaire des nœuds avancés, est égal à 1.

P_{opt}: Le pourcentage optimal de CH, est égal à 0.05.

Une comparaison a été faite entre les deux Approches de notre protocole.

4.5.1. Résultats

La figure 4.13 montre les différents résultats de simulation obtenus après l'exécution de 300 itérations pour la première approche (MOD_HEED_WR) de notre protocole.

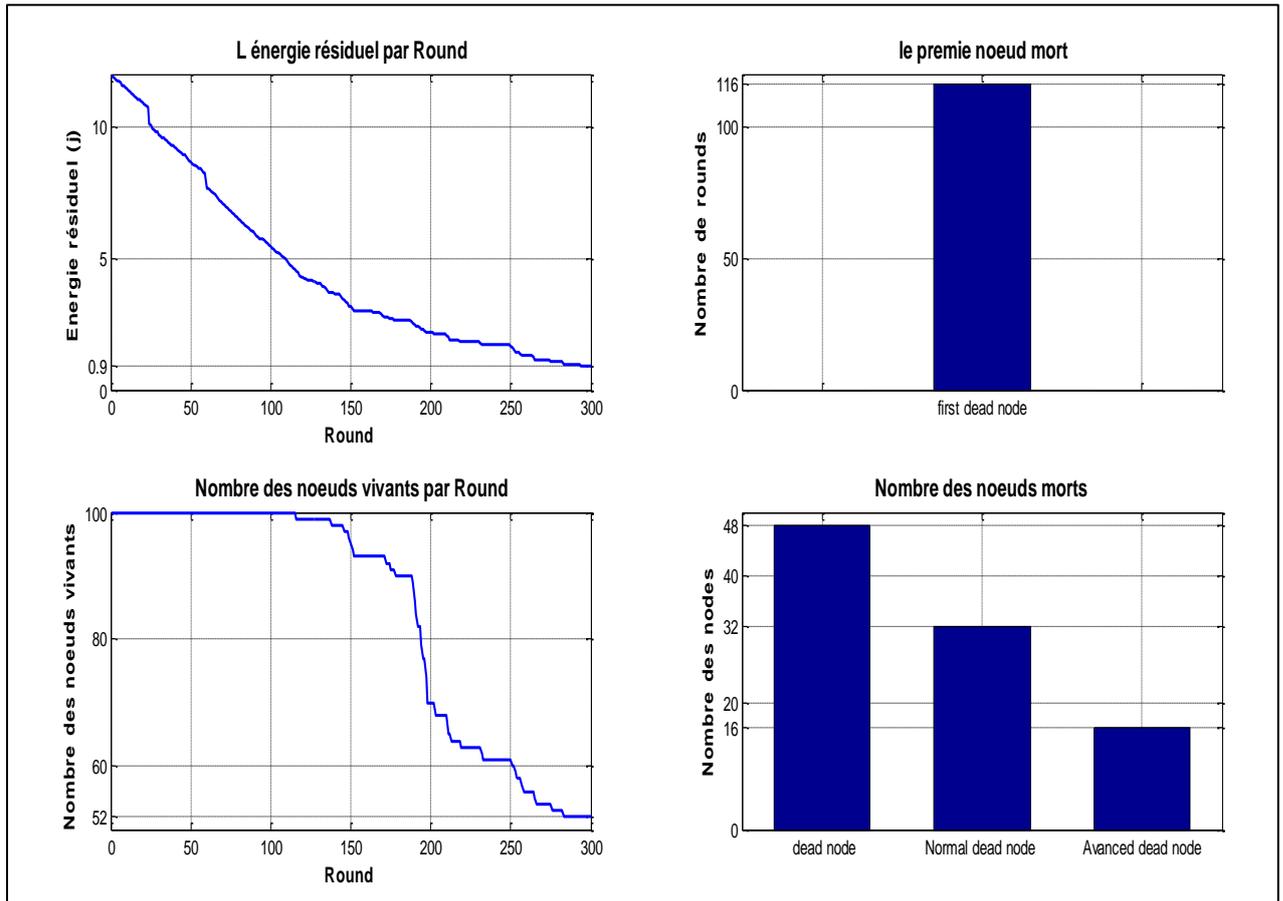


Figure 4. 13: Résultats de simulation de MOD_HEED_WR.

La figure 4.14 montre les différents résultats de simulation obtenus après l'exécution de 300 itérations pour la deuxième approche (MOD_HEED_R).

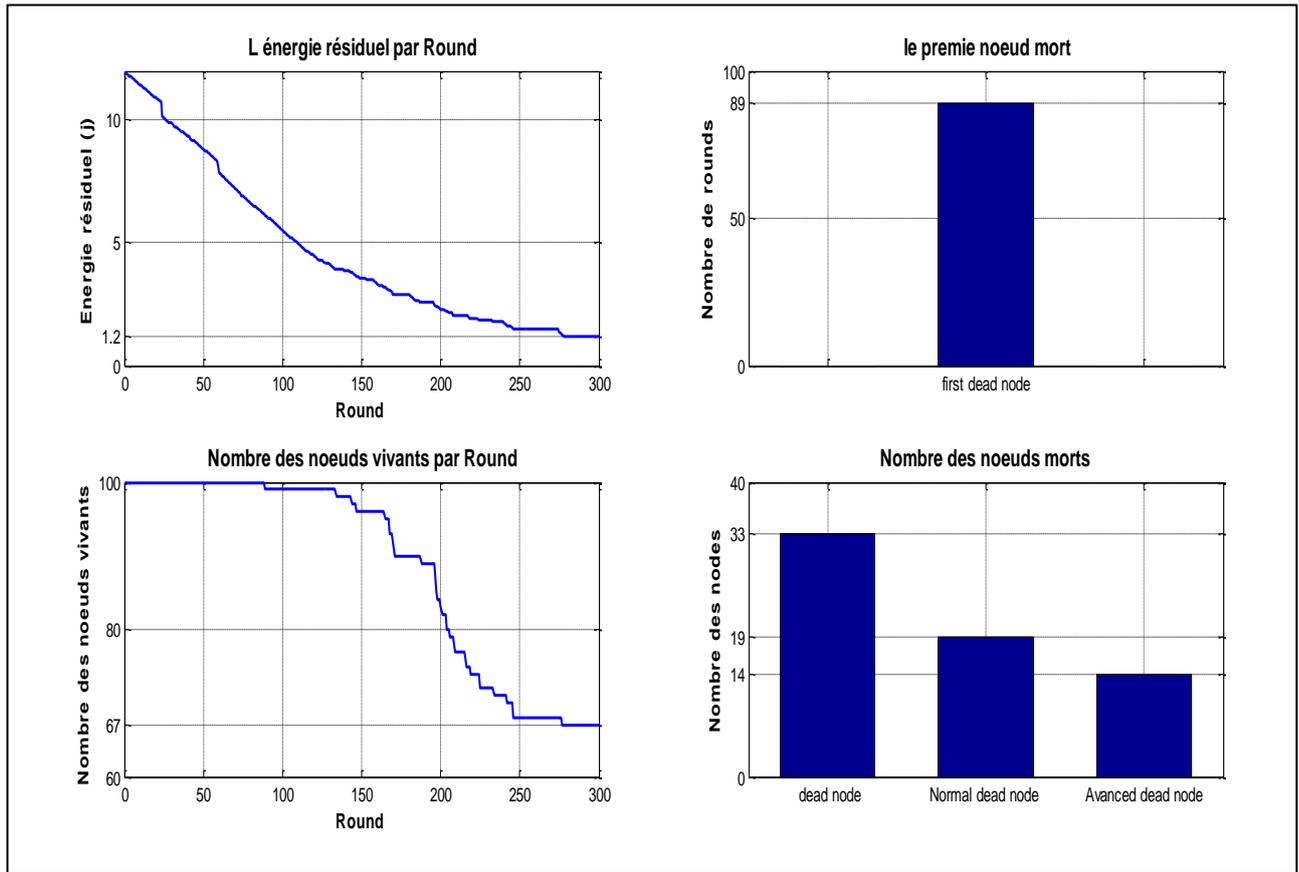
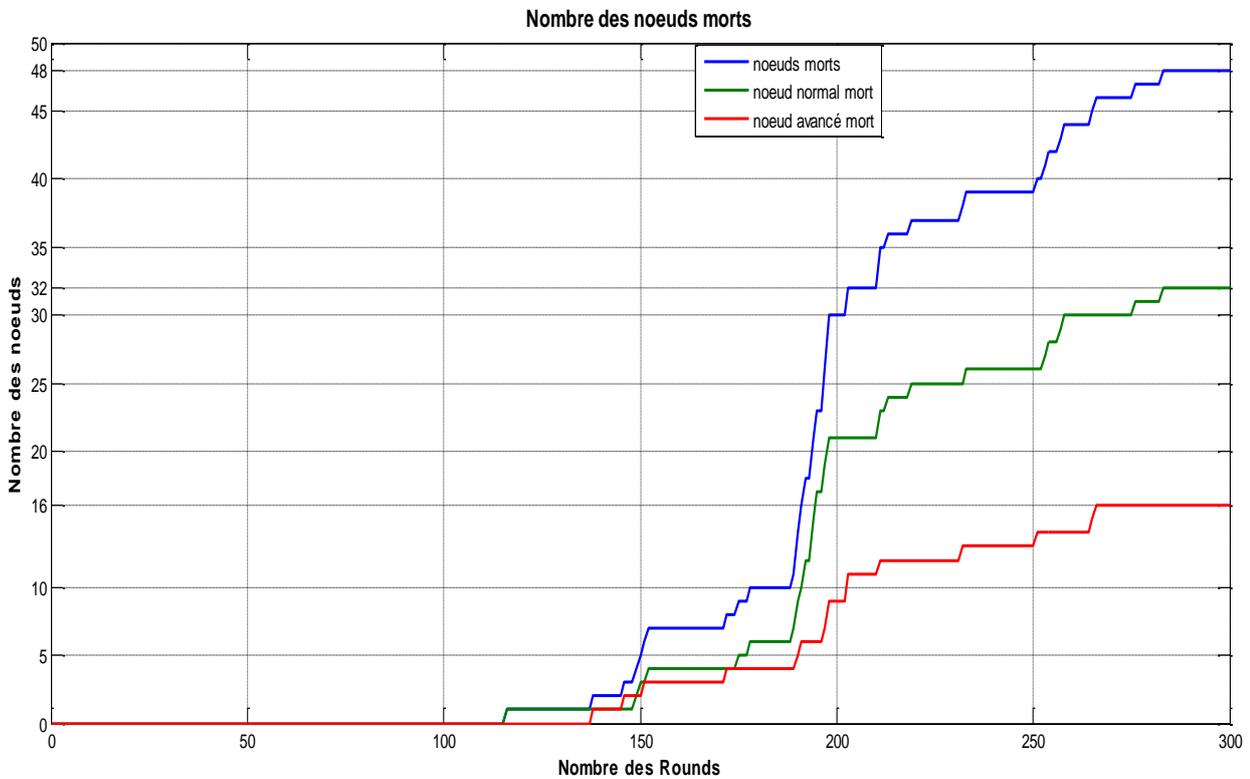
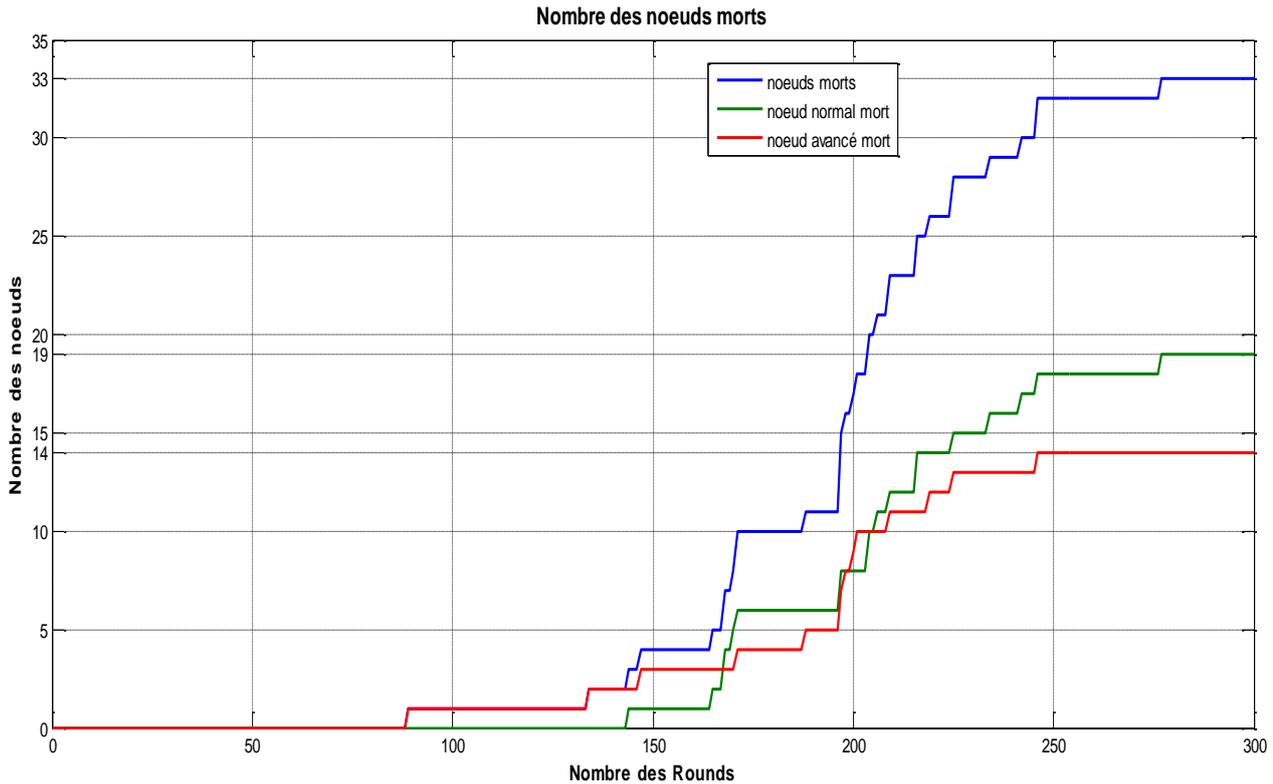


Figure 4. 14: Résultats de simulation de l'approche MOD_HEED_R.



15: Nombre des nœuds morts dans l'approche MOD_HEED_WR.

Figure 4.



Figure

4. 16: Nombre des nœuds morts dans l'approche MOD_HEED_R.

4.5.2. Analyse des résultats

Les résultats de la simulation illustrés dans les figures 4.13 et 4.14 montrent que dans l'énergie résiduelle versus le nombre de rounds la deuxième approche " MOD_HEED_R" consomme moins d'énergie (l'énergie résiduelle est égale à 1.2 dans l'itération 300) par rapport à la première approche " MOD_HEED_WR" (l'énergie résiduelle est égale à 0.9 dans l'itération 300) en raison de la transmission des données entre les CHs et la SB. Dans le cas où les CHs sont très éloignés à la station de base, les communications inter-cluster entre ces derniers et la station de base, exigent un cout élevé des émissions, ce qui cause un grand gaspillage de l'énergie. Au contraire, dans la deuxième approche, on applique la technique des relais (construction une chaîne entre les CHs) où CH le plus éloigné transmettre ses données au CH le plus proche de lui, ce qui réduit la consommation d'énergie. Mais pas une grande différence, car même la première approche donne des bons résultats grâce à la technique utilisée dans les deux approches qui est : la sélectionner du CH dépend à l'énergie restante du nœud. Et cela affecte positivement sur la durée de vie du réseau. C'est vrai que dans " l'approche MOD_HEED_WR " le premier nœud mort avant " l'approche MOD_HEED_R " mais après plusieurs itérations, nous observons clairement que " MOD_HEED_R " est plus performante que " MOD_HEED_WR " en termes d'optimisation de la durée de vie du réseau. D'après les résultats de la simulation, nous pouvons constater que le nombre des nœuds vivants diminue avec l'évolution des itérations pour les deux solutions, mais il reste des nœuds vivants jusqu'à l'itération 300, dans "l'approche MOD_HEED_R " il reste 67 nœuds vivants et dans "l'approche MOD_HEED_WR " il reste 52 nœuds vivants.

Nous observons également que le premier nœud meurt dans " MOD_HEED_WR " après environ l'itération 116, et après environ l'itération 89 dans la deuxième approche.

Dans les figures 4.15 et 4.16, nous pouvons constater que le nombre des nœuds morts dans " MOD_HEED_WR " est 48 où le nombre des nœuds normal morts est 32 et nœud avancé est 16 parmi 20, c'est-à-dire il reste seulement 4 nœuds avancés parce que les nœuds avancés ont plus de chance d'être choisi comme CHs grâce à leur énergie qui est plus élevé de l'énergie initiale du nœud normal. À cause de la transmission des paquets à la station de base, l'énergie du nœud est diminué jusqu'à le nœud est mort. Le nombre des nœuds morts dans " l'approche MOD_HEED_R " est 33 où nombre des nœuds normal morts est 19 et nombre des nœuds avancé est 14.

Alors, nous pouvons déduire que la deuxième approche de notre protocole proposé présente un rendement plus élevé en termes d'énergie consommée et de la durée de vie du réseau par rapport à la premier approche. Cela est dû à l'efficacité de notre technique utilisée pour sélectionner les meilleurs CHs ainsi qu'à la technique utilisée (les relais) pour la transmission des données entre les CHs et la SB.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons présenté en détail notre contribution proposée. Nous avons proposé un protocole pour résoudre le problème de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, nous avons présenté notre simulation pour les deux approches proposés de notre protocole et les différents résultats obtenus. Enfin, nous avons analysé ces résultats en les comparant les deux approches.

Conclusion générale

Basant sur les technologies de communication sans fils, la production et l'utilisation des micro-capteurs a connu un progrès exponentiel lorsqu'il s'agit du captage et analyse des informations concernant les différentes zones géographiques ; ces capteurs, en utilisant les technologies de communications, forment des réseaux de capteurs sans fils (RCSFs), où les capteurs représentent des nœuds qui sont responsables de collecter, de stocker, de traiter et encore capable d'effectuer une transmission sans fils vers le nœud puits appelé la station de base (SB).

Les capteurs sans fils déployés ont une durée de vie limitée, car ils sont généralement alimentés par des batteries, cela propose l'un des plus challenges et obstacles dans les réseaux de capteurs sans fils qui nécessite des solutions efficaces, dans ce cas le but est de minimiser la consommation d'énergie et la maximiser les durées de vie des capteurs en utilisant les différentes techniques de conservations d'énergie dans les RCSFs.

Le routage est considéré comme l'un des aspects les plus critiques dans les réseaux de capteurs sans fils, il permet aux nœuds de transférer les données collectées entre le micro-capteur et la station de base. La technique de routage la plus souvent utilisée est le routage multi-sauts, c'est-à-dire que l'information est passée par plusieurs nœuds intermédiaires avant d'arriver à la station de base. Par conséquent, un nœud consomme de l'énergie pour transmettre ses données ou relayer des données vers d'autres nœuds. Pour cela, la stratégie de routage doit prendre en compte la bonne gestion de l'énergie des nœuds capteurs, prolongeant ainsi la durée de vie du RCSF.

Dans ce mémoire, nous étudions le problème de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil avec la possibilité de prolonger la durée de vie. Nous avons proposé le protocole "MOD_HEED" pour traiter ce problème afin de minimiser la consommation énergétique, nous avons suggère deux approches de ce protocole selon le critère d'acheminer les données entre les clusters head et la station de base. Les résultats de la simulation montrent que la deuxième approche (MOD_HEED_R) de notre protocole proposé présente un rendement plus élevé en termes d'énergie consommée et de la durée de vie globale du réseau par rapport à la première approche (MOD_HEED_WR). Comme perspective, afin d'améliorer la performance de nos résultats obtenus, nous prenons en compte les points de vue suivants :

CONCLUSION GENERALE

- Ajouter autres métriques de comparaison pour tester la performance.
- Prendre le cas d'une station de base mobile.
- Comparer l'approche proposée avec d'autres techniques existantes dans la littérature pour voir leur efficacité dans le domaine des économies d'énergie en RCS

Références

- [1] : A. Campbell. The science and engineering of microelectronic fabrication. Oxford University Press, 2001.
- [2] : <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/maths/astuce/tous-niveaux-7/tpe-2010-physique.html>
- [3] : Chapitre 2 LES_DIFFERENTS_TYPES_DE_CAPTEURS
- [4] : B. Mohamed, “Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil“, Mémoire de magistère, Ecole nationale supérieure d'informatique Oued- Smar Alger Algérie, 2013.
- [5] : https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_14.html
- [6] : A. Samir, “Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil“, Mémoire de magistère, Département d'Informatique, Université Hadj Lakhder - Batna, juillet 2010.
- [7] : <https://www.elprocus.com/introduction-to-wireless-sensor-networks-types-and-applications/>
- [8] : B. Krishnamachari, “Networking Wireless Sensors”, Cambridge University Press, 2005.
- [9] : M. Samia, O. Souhila, “Implémentation et évaluation des schémas de routage sur une plateforme réelle de réseaux de capteurs sans fil”, Mémoire de Master, Département d'Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, juin 2014.
- [10] : https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_11.html
- [11] : M.O. Farooq and T. Kunz, “Operating systems for wireless sensor networks: A Survey”, Sensors, Volume 11, (Issue 6), pages: 5900–5930, 2011.
- [12] : S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. et al, “Mantis OS: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms”, Mobile Networks and Applications Journal, Special Issue on Wireless Sensor Networks, August 2005.
- [13] : P. Yves, K. Frédéric, “Capteurs - Définitions, principes de détection”, mars 2009.
- [14] : <https://www.omega.fr/prodinfo/sansfil.html#:~:text=Les%20capteurs%20sans%20fil%20peuvent%20%C3%AAtre%20utilis%C3%A9s%20pour,contr%C3%B4l%C3%A9s%20centralis%C3%A9s%20d'un%20processus%20ou%20d'une%20usine%20o%C3%A9n%C3%A9e,19%20novembre%202021.>

- [15]: : Généralités sur les capteurs
<https://www.bing.com/search?q=les+capteurs+num%c3%a9riques&FORM=AWRE>
- [16]: I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks". IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [17]: F. Brissaud, D. Charpentier, A. Barros et C. Bérenguer, « capteurs intelligents : nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sûreté de fonctionnement », Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon : France (2008)
- [18]: Capteurs–Généralité
<http://notesdecoursbeauraing.emonsite.com/medias/files/capteurs-complet-prof.pdf>
- [19]: KACIMIRahim, « Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil », Doctorat de l'université de Toulouse, Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse, spécialité : réseaux et télécommunications.
- [20]: A. Giridhar and P. Kumar, "Maximizing the functional lifetime of sensor networks", in *proceedings of the 4th International Symposium on Information Proceeding in Sensor Network (IPSN)*, 2005, pp. 13-19.
- [21]: Y. Chen and Q. Zhao, "On the Lifetime of Wireless Sensor Networks", in *IEEE Communication letters*, Vol. 9, No. 11, November 2005, pp. 976-978.
- [22]: M. Esseghir, N.Bouabdallah, and G.Pujolle, "A Novel Approach for Improving Wireless Sensor Network Lifetime", in *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2005, pp. 2701-2706.
- [23]: Z. Hu and B. Li, "On the fundamental capacity and lifetime limits of energy-constrained wireless sensor networks", in *Proceedings of 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2004.
- [24]: R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, and A. Conti, "Wireless Sensor and Actuator Networks Technologies, Analysis and Design", London, UK, Elsevier, 2008.
- [25]: khadidja FELLAH, "optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles", Doctorat en sciences de l'université de Oran, spécialité : informatique
- [26]: M. YOUNIS, T. NADEEM, "Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks", *Rapport technique*, Mryland Baltimore pays University, USA, 2004.
- [27]: M. Ilyas and I. Mahgoub. "Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [28]: Han Namgoong, Dongman Lee, Dukyun Nam, "Energy efficient topology for wireless microsensor networks" in *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, 2005.

- [29] : Elena Fasolo, Michele Rossi, Jorg Widmer, et al . ''Innetwork aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey''. *Wireless Communications, IEEE*, vol. 14, no. 2,pp. 70-87, 2007.
- [30] : Ryo Sugihara , Rajesh K Gupta. ''Path planning of data mules in sensor networks''. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 8, no 1, pp.1, 2011.
- [31] : Christos G Cassandras, Shixin Zhuang "Optimal dynamic voltage scaling for wireless sensor networks with real-time constraints" in Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2005.
- [32] : Paolo Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks" in ACM computing surveys (CSUR), 2005.
- [33] : Sri Kumar, Feng Zhao, David Shepherd, "Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks" in Signal Processing Magazine, IEEE, 2002.
- [34] : Han Namgoong, Dongman Lee, Dukyun Nam, "Energy efficient topology for wireless microsensor networks" in Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks, 2005.
- [29] : Elena Fasolo, Michele Rossi, Jorg Widmer, et al . ''Innetwork aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey''. *Wireless Communications, IEEE*, vol. 14, no. 2,pp. 70-87, 2007.
- [30] : Ryo Sugihara , Rajesh K Gupta. ''Path planning of data mules in sensor networks''. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 8, no 1, pp.1, 2011.
- [31] : Mohammed, A. A. B. (2012). Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle. *Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique. Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, 2013.*
- [32] : Bouallegue, M. (2016). *Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil* (Doctoral dissertation, Université du Maine).
- [33] : El Aalaoui, A. (2021). *Minimisation Avancée de la Consommation d'Énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil* (Doctoral dissertation, ABDELMALEK ESSAADI UNIVERSITY).
- [34] : Beydoun, K. (2009). Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. *PHD Report*.
- [35] : Younis, O., & Fahmy, S. (2004). HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 3(4), 366-379.
- [36] : Fang, Q., Zhao, F., & Guibas, L. (2003, June). Lightweight sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation. In *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile ad hoc networking & computing* (pp. 165-176).

- [37] : Mejri, Naourez, and Farouk Kamoun. "Algorithme de routage hiérarchique mheed à plusieurs sauts pour les grands réseaux de capteurs." *4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications*. 2007.
- [38] : R. Priyadarshi, L. Singh, Randheer and A. Singh, "A Novel HEED Protocol for Wireless Sensor Networks," *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2018, pp. 296-300, doi: 10.1109/SPIN.2018.8474286.
- [39] : Ever, E., Luchmun, R., Mostarda, L., Navarra, A., & Shah, P. (2012). Uheed-an unequal clustering algorithm for wireless sensor networks.
- [40] : Meena S. Doibale, G. D. Kurundkar. (2019, November). Congestion Control in Wireless Sensor Network using HEED Protocol. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. Vol. 9, pp. 469-473.
- [41] : Ullah, Z., Mostarda, L., Gagliardi, R., Cacciagrano, D., & Corradini, F. (2016, March). A comparison of heed based clustering algorithms--Introducing ER-HEED. In *2016 IEEE 30th international conference on advanced information networking and applications (AINA)* (pp. 339-345). IEEE.
- [42] : Aoudia, H., Touati, Y., Ali-Cherif, A., & Greussay, P. (2012, October). Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil. In *9ème édition de la conférence MANifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication-MajecSTIC 2012 (2012)*.
- [43]: Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., & Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4), 660-670.
- [44]: Holger, K., & Andreas, W. (2007). Protocols and architectures for wireless sensor networks.
- [45]: Evaluation de LEACH dans un environnement fortement bruité. fatima zohra REMMAS (2015).
- [46]: S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh et W. B. Heinzelman, "A taxonomy of wireless microsensor network models", *Mobile Computing and Communications Review*, vol. 6, no. 2, pp. 28-36, April 2002.
- [47]: YACINE, Younes. *Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs*. 2012. Thèse de doctorat. Tizi Ouzou.
- [48]: Technnology review: Tracking a shopper's habits.
<http://www.technologyreview.com/computing/21161/>. Michael Fitzgerald, August 2008.
- [49]: Bouallegue, M. (2016). *Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil* (Doctoral dissertation, Université du Maine).
- [50]: BELAGUID, A., MALOUKI, Y. (2016). Économie d'énergie dans les réseaux de

capteurs sans fil.

- [51]: Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3) :493_506, 2004.
- [52]: Mahmood Ali, Annette Böhm, and Magnus Jonsson. Wireless sensor networks for surveillance applications - A comparative survey of MAC protocols. In *Proceedings of the 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC '08)* , pages 399_403, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [53]: Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2) :40_50, March 2002.
- [54]: Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, Andrea Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey” in *Ad hoc networks*, 2009.
- [55]: Felea, V. (2008). Routage dans les réseaux de capteurs sans fil. *JournéesResCom Strasbourg, Université de franche. comté*, 9-10.
- [56]: **A. E. Kamal J.N. Alkaraki**. Routing Techniques in Wireless Sensor Network: A Survey Dept. of Electrical and Computer Engineering Iowa State University, Ames Iowa 50011,2005.