



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTÉ DES MATHÉMATIQUES ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Spécialité : Réseau et télécommunication

Par :

Zair Fatima Zohra
Zitoune Fatma Zohra

Sur le thème

Étude et simulation d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie.

Soutenu publiquement le 13 / 06 / 2024 à Tiaret devant le jury composé de :

Mr. KOUADRIA Abderrahmane	MCB Université Ibn Khaldoun Tiaret	Président
Mr. BENGHENI Abdelmalek	MCA Université Ibn Khaldoun- Tiaret	Encadrant
Mr. KHERICI Cheikh	MCB Université Ibn Khaldoun- Tiaret	Examineur

2023-2024

Remerciements

En premier lieu, nous rendons grâce "**Allah**" des bienfaits qu'il nous ont accordé durant toute notre vie, de nous avoir permis de faire ce travail et de nous avoir donné la force, le courage et la patience d'achever ce mémoire.

Nous remercions Monsieur, **BENGHENI Abdelmalek** d'avoir accepté d'être notre encadreur et d'avoir dirigé ce travail durant toute l'année avec beaucoup d'efforts et de patience.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Monsieur **KOUADRIA Abderrahmane** et Monsieur **KHERICI Cheikh** qui ont pris de leur temps pour juger ce modeste travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude et tout notre respect.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous les enseignants du département informatique d'université de Tiaret qui nous ont enseigné durant ce cursus universitaire.

Nous remercions tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.

Finalement, nous tenons à remercier tous nos amis qui nous ont apporté leur soutien moral pendant cette année d'études.

Dédicaces

Je dédie ce travail

*À mes Parents pour tous les soutiens qu'ils m'ont
apportés, malgré les situations difficiles que nous
traversons.*

*À mes sœurs Aïcha, Souad, Amîna et Safia à mes deux
frères Saleh et Mohamed pour leurs présence à mes
côtés.*

*Et surtout ma sœur Soumia pour tous les efforts et
ses conseils et Imed, Inès et Djawad.*

*À tous mes amis qui m'ont encouragée dans les
moments difficiles.*

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce travail

*À ma mère pour tous les soutiens qu'il m'a apportés,
malgré les situations difficiles que nous traversons.*

*À mes soeurs Hadjer et Houda à mes deux frères
oussama et fares pour leurs présence à mes côtés.*

*À tous mes amis qui m'ont encouragée dans les
Moments difficiles.*

À tous ceux que j'aime;

Et à tous ceux qui m'aiment;

*Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux
de bonheur, de santé et de réussite.*

FATIMA. ZOHRA

La liste des figures	I
La liste des abréviations	II
Résumé	III
Introduction générale	01
<u>Chapitre 1: Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)</u>	
1.1 Introduction	03
1.2 Notion d'un nœud de capteur	03
1.2.1 Définition.....	03
1.2.2 Architecture d'un nœud capteur	03
1.3 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs).....	05
1.3.1 Définition d'un RCSF	05
1.3.2 Architecture d'un RCSF	06
1.3.3 Les différents types d'un RCSF.....	07
1.3.4 La pile protocolaire dans un RCSF.....	08
1.3.4.1 Les différentes couches	08
1.3.4.2 Les différents plans de gestion	10
1.3.5 Les contraintes d'application des RCSF.....	10
1.3.5.1 L'efficacité énergétique.....	10
1.3.5.2 La scalabilité (La passage à l'échelle)	10
1.3.5.3 La latence.....	11
1.3.5.4 Le débit	11
1.3.5.5 L'équité dans le partage du canal.....	11
1.3.6 Les domaines d'application des RCSF.....	11
1.3.7 La connectivité dans les RCSF.....	13
1.3.8 La couverture dans les RCSF.....	14
1.3.9 La durée de vie d'un RCSF.....	14
1.3.10 Les sources de consommation d'énergie dans les RCSF.....	15
1.4 Conclusion.....	16
<u>Chapitre 2: Le protocole de routage LEACH</u>	
2.1 Introduction.	17
2.2 Le protocole de routage hiérarchique.....	17

2.2.1 Définition de routage.....	17
2.2.2 protocoles de routage hiérarchiques.....	17
2.3 Le protocole Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(LEACH).....	18
2.3.1 Description de protocole LEACH.....	18
2.3.2 L'objectif du protocole LEACH	19
2.3.3 Le principe de base du protocole LEACH	19
2.3.4 Les différentes phases du protocole LEACH	19
2.3.4.1 La phase de configuration du cluster (setup phase).....	20
2.3.4.2 La phase de transmission de données (steady state phase)	21
2.3.5 Les avantages du protocole LEACH	22
2.3.6 Les inconvénients du protocole LEACH	22
2.3.7 Limitations du protocole LEACH	23
2.4 Conclusion	24
 <u>Chapitre 3: Les protocoles de routage hiérarchiques pour les RCSF-RE</u>	
3.1 Introduction	25
3.2 Définition de la récupération d'énergie (RE).....	25
3.3 Les nœuds de capteur à récupération d'énergie	25
3.3.1 Architecture du système de récupération d'énergie	26
3.3.1.1 Architecture Récupérer-Utiliser.....	27
3.3.1.2 Architecture Récupérer-Recharger-Utiliser.....	27
3.4 Les sources d'énergie pour la récupération énergétique	27
3.5 Les techniques de la récupération énergétique	27
3.5.1 Récupération de l'énergie mécanique	27
3.5.2 Récupération de l'énergie photovoltaïque	28
3.5.3 Récupération de l'énergie thermique	28
3.5.4 Récupération de l'énergie à partir du corps humain	28
3.6 Définition d'un réseau de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE)	28
3.7 Les protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF-RE.....	29
3.7.1 Le protocole de clustering de récupération d'énergie (NEHCP)	29
3.7.2 CPEH: A Clustering Protocol for the EH-WSN.....	30
3.7.3 Le protocole NEEC.....	31
3.7.4 Le protocole EH-SEP.....	32

3.7.5 Le protocole HCEH-UC.....	32
3.8 Conclusion.....	33
Chapitre 4: Simulation et Evaluation	
4.1 Introduction	34
4.2 Définition du problème.....	34
4.3 Objectifs du travail.....	34
4.4 Le protocole proposé.....	34
4.5 Les phases de fonctionnement du protocole simulé.....	35
4.6 L'environnement de travail utilisé.....	36
4.6.1 Définition du MATLAB.....	36
4.6.2 Les particularités du MATLAB.....	37
4.7 La simulation.....	37
4.7.1 Les paramètres de Simulation utilisés.....	38
4.7.1.1 Les paramètres du RCSFs à récupération d'énergie.....	38
4.7.1.2 Les paramètres de simulation utilisés pour le protocole simulé.....	39
4.7.2 Description de la simulation.....	39
4.7.2.1 Les métriques de performance	39
4.7.2.2 Bloc de fonctionnement du protocole simulé	39
4.7.3 Description et Evaluation des résultats trouvés	40
4.7.3.1 L'interface principale	40
4.7.3.2 Déploiements des nœuds de capteurs.....	41
4.7.3.3 Le déroulement du protocole EH-LEACH	42
4.7.3.4 Les résultats et discussion	42
4.8 Conclusion.....	47
Conclusion générale.....	48
Bibliographie.....	50

La liste des figures

Figure 1.1: Nœud capteur sans fil.....	03
Figure 1.2: Architecture d'un capteur sans fil.....	04
Figure 1.3: Exemple de réseau de capture sans fil.....	05
Figure 1.4: Architecture d'un RCSF.....	06
Figure 1.5: Architecture plate d'un RCSF.....	06
Figure 1.6: Architecture hiérarchique à base de clusters d'un RCSF.....	06
Figure 1.7: La pile protocolaire des RCSF	08
Figure 1.8: Le rôle de la couche liaison de données.....	09
Figure 1.9: Applications des RCSF.....	12
Figure 1.10: Les différents rayons d'un nœud capteur.	14
Figure 2.1: Le principe de protocole LEACH.....	18
Figure 2.2: Les différentes phases utilisée par le protocole LEACH.....	19
Figure 2.3: l'organigramme de la phase d'initialisation (set-up).....	20
Figure 2.4: La répartition du temps dans la phase de transmission.....	22
Figure 2.5: l'organigramme de la phase de transmission (steady state phase).....	22
Figure 3.1: Les composants d'un nœud capteur à récupération d'énergie.....	26
Figure 3.2: Les architectures d'un système à récupération d'énergie.....	26
Figure 3.3: Le schéma fonctionnel de l'algorithme NEHCP.....	30
Figure 3.4: Le calendrier de communication de base du CPEH travail en rounds.....	30
Figure 3.5 Le schéma fonctionnel de l'algorithme NEEC.....	31
Figure 4.1 : Organigramme du bloc de fonctionnement du simulateur du EH-LEACH.....	40
Figure 4.2 : l'interface principale du simulateur.....	41
Figure 4.3 : Déploiement aléatoire des nœuds capteurs.....	41
Figure 4.4 : Élection des CH et la création des clusters associés.....	42
Figure 4.5: Le nombre de nœuds morts.....	43
Figure 4.6: Le nombre de nœuds vivants.....	44
Figure 4.7: Le nombre de Cluster Head par tour.....	45
Figure 4.8: Paquets envoyés à CH.....	45
Figure 4.9: Paquets envoyés à SB.....	46
Figure 4.10: La somme de quantité de données reçues par SB et CH.....	47
Figure 4.11: Energie résiduelle moyenne.....	47

La liste des abréviations

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fils

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

EH-LEACH: Energy Harvesting Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

CH: Cluster Head.

EAR: Eavesdrop And Register

TDMA: Time Division Multiple Access

CDMA: Code Division Multiple Access

MATLAB : Matrix Laboratory.

EH : Energy Harvesting

RCSF-RE: Réseaux de Capteurs Sans Fils à Récupération d'Énergie

BS : Base Station

EH-WSN : Energy Harvested Wireless Sensor Networks

NEHCP : Network Energy Harvesting Clustering Protocol

CPEH : Clustering Protocol for the Energy Harvesting

NEEC : Novel Energy Efficient Clustering

EH-SEP: Energy Harvesting –Stable Election Protocol

HCEH-UC : Hierarchical Cluster-based Energy Harvesting for Uninterrupted Coverage

WSN: Wireless Sensor Networks.

OSI: Open Systems Interconnection.

MAC: Medium Access Control.

ملخص :

تكتسب تقنية حصاد الطاقة (EH) في شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN) شعبية عن طريق إزالة عبء استبدال/إعادة شحن مصادر الطاقة المستنفدة بأجهزة حصاد الطاقة. في السنوات الأخيرة، دفعت القيود المفروضة على الطاقة الباحثين إلى تطوير عقد استشعار تحصد الطاقة من البيئة. تعمل WSN على تحسين الأداء باستخدام تقنيات مثل التوجيه والتجميع وحصاد الطاقة من البيئة. تسمى هذه الشبكات شبكات الاستشعار اللاسلكية لحصاد الطاقة (EH-WSN). نظرًا للخصائص الفريدة لوحدة EH-WSN، فإن طرق تجميع وتوجيه المستعملة في WSN النموذجية غير فعالة لشبكات EH-WSN. ولذلك فإن الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة وتقييم أداء بروتوكول التوجيه الهرمي المقترح لـ EH-WSN باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB.

الكلمات المفتاحية: حصاد الطاقة ، شبكات الاستشعار اللاسلكية لحصاد الطاقة ، التوجيه الهرمي، برنامج المحاكاة Matlab.

Abstract:

Energy harvesting (EH) technology in wireless sensor networks (WSN) is gaining popularity by removing the burden of replacing/recharging depleted energy sources with energy harvesting devices. In recent years, energy constraints have led researchers to develop sensor nodes that harvest energy from the environment. RCSFs improve performance using techniques such as routing and clustering, harvesting energy from the environment. These networks are called Energy Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSN). Due to the unique characteristics of EH-WSN, typical WSN grouping and routing methods are inefficient for EH-WSN. Therefore the objective of this work is to study, simulate and evaluate the performance of a hierarchical routing protocol proposed for RCSF-RE using the MATLAB simulator.

Keywords: Energy harvesting (EH), Energy Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSN), Hierarchical routing, MATLAB.

Résumé :

La technologie de récupération d'énergie (RE) dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) gagne en popularité en supprimant la charge de remplacer/recharger les sources d'énergie épuisées par des dispositifs de récupération d'énergie. Ces dernières années, les contraintes énergétiques ont conduit les chercheurs à développer des nœuds capteurs qui récupèrent l'énergie de l'environnement. Les RCSF améliorent les performances en utilisant des techniques telles que le routage et le clustering, en récupérant l'énergie de l'environnement. Ces réseaux sont appelés les Réseaux de Capteurs Sans Fil à Récupération d'Énergie (RCSF-RE). En raison des caractéristiques uniques des RCSF-RE, les méthodes typiques de regroupement et de routage des RCSF sont inefficaces pour les RCSF-RE. De ce fait l'objectif de ce travail est d'étudier, simuler et évaluer les performances d'un protocole de routage hiérarchique proposé pour les RCSF-RE par l'utilisation du simulateur MATLAB.

Mots clés. La récupération d'énergie (RE), Les Réseaux de Capteurs Sans Fil à Récupération d'Énergie (RCSF-RE), Routage hiérarchique, MATLAB

Introduction Générale

Introduction Générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF, en anglais WSN : Wireless Sensor Networks) se composent généralement d'un ensemble de nœuds capteurs à ressources limitées avec une source d'alimentation étroite, dont chacune a la capacité de détecter, calculer et communiquer pour effectuer une tâche commune.

Au cours de ces dernières années, les RCSF ont été un sujet de recherche important avec une large gamme d'applications, y compris environnementales, industrielles, militaires et applications de santé. Une caractéristique inhérente aux RCSF est leur déploiement aléatoire dans des zones inaccessibles où le rechargement ou remplacement de la source d'énergie d'un nœud n'est pas souvent pratique. Les nœuds capteurs perdent leur fonctionnement lorsque leur source d'alimentation est épuisée. L'accent a donc été largement placé sur la maximisation de la durée de vie des RCSF basés sur l'utilisation efficace de leur source d'énergie. La conception des protocoles de routage éco-énergétique de type hiérarchique comme «Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)» sont devenus un sujet de recherche central.

Un grand nombre de protocoles de routage hiérarchiques ont été proposés pour les RCSF conventionnels à énergie limitée. Bien que ces protocoles étendent la durée de vie des RCSF, l'épuisement inévitable de la batterie aboutit finalement à ce qu'un réseau perde son fonctionnement.

Par l'utilisation de la récupération d'énergie (RE) de nouveaux types de nœuds capteurs ont été construits, capables de récolter de l'énergie de l'environnement externe (solaire, vibratoire et thermique etc.) sont appelés des nœuds de capteur à récupération d'énergie, cela a changé le critère de conception fondamental des protocoles de routage hiérarchiques pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE). L'objectif principal de ces protocoles de routage hiérarchiques est d'augmenter les performances d'un réseau sur la base des quantités d'énergie récoltées exploitées dans l'énergie résiduelle des nœuds afin d'assurer le fonctionnement performant du RCSF-RE avec une efficacité énergétique.

Dans ce mémoire, notre objectif est d'étudier les protocoles de routage hiérarchiques récemment proposés pour les RCSF-RE, puis de simuler et d'évaluer l'un de ces protocoles de routage basé sur la récolte énergétique à l'aide du simulateur MATLAB en intégrant un nouveau module de récupération d'énergie au niveau de l'architecture du nœud de capteur.

Organisation du mémoire

En plus d'une introduction et d'une conclusion, Ce mémoire est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil : leurs architectures de communication, leurs domaine d'applications, ainsi que la description de la pile protocolaire avec ses différentes couches et plans de gestion et à la fin en exposant la connectivité, la couverture, la durée de vie et leurs sources de pertes d'énergie.
- Le deuxième chapitre, est consacré à la présentation du protocole de routage hiérarchique LEACH.
- Le troisième chapitre expose quelques protocoles de routage hiérarchiques récemment proposés pour les RCSF-RE, en donnant quelques définitions telles que : la définition de la récupération d'énergie, les architectures des systèmes de récupération d'énergie, etc.
- Dans le dernier chapitre nous détaillerons la présentation du notre protocole de routage hiérarchique EH-LEACH, leur simulation à l'aide du simulateur MATLAB puis en évaluant les différents résultats trouvés.

Chapitre 1

«Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)»

1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée et omniprésente. De très nombreux états de l'art ont été proposés, nous allons donc dans le présent chapitre présenter les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication et leurs applications.

Nous allons discuter également les principaux facteurs et contraintes qui influencent sur la conception des réseaux de capteurs sans fil.

1.2 Notion d'un nœud de capteur

1.2.1 Définition

Un capteur est un petit dispositif électronique qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, humidité, vibration, etc.). Chaque capteur assure les trois principales fonctions de base qui sont : l'acquisition de données, les traitements sur ces données et leurs communications aux stations de bases [1].

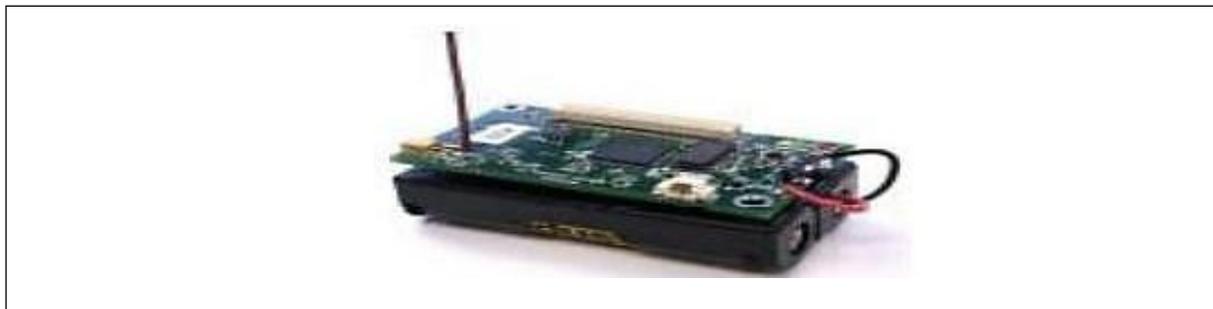


Figure 1.1: Nœud capteur sans fil [2].

1.2.2 Architecture d'un Nœud capteur

On peut diviser l'architecture des capteurs en deux parties, l'architecture matérielle et l'architecture logicielle sont complémentaires car elles composent le capteur dans son intégralité. Pour cette raison, nous développerons les deux architectures [4].

1.2.2.1 Architecture matérielle [4]

Il y a quatre principales unités, qui sont présentées ci-dessous :

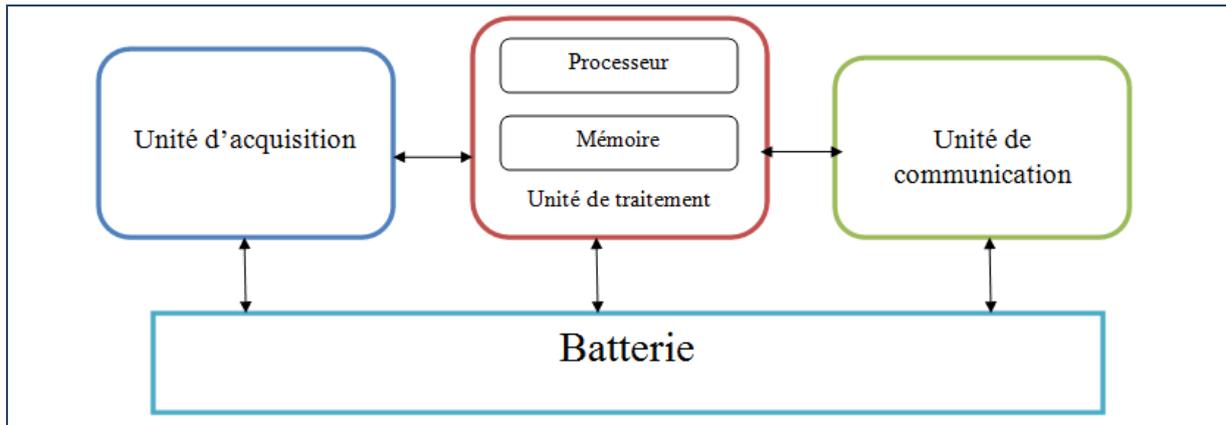


Figure 1.2: Architecture d'un nœud capteur sans fil [4].

1. Unité d'acquisition (*Sensing unit*)

Unité de capture ("Sensing unit"): est composée de deux sous-unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC ("Analog to Digital Converter"). Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques et l'ADC transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

2. L'unité de traitement (*Processing unit*)

Se compose, de deux interfaces une est liée avec l'unité de d'acquisition et l'autre avec l'unité de communication, elle comprend un processeur et une mémoire. Ses fonctions principales sont l'exécution de protocoles de communication qui permettent de faire collaborer le Capteur avec d'autres capteurs et peut aussi analyser les données captées.

3. L'unité de communication (*Transceiver unit*)

Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un médium « sans-fil ». Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radiofréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, ne pouvant pas établir de liaisons à travers des obstacles, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Les unités de transmission de type radiofréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ceci implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur. Concevoir des unités de transmission de type radiofréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante. L'alternative consistant à utiliser de longues antennes n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs.

4. L'unité d'énergie (*Power unit*)

Le composant plus importants d'un nœud capteur sont l'unité d'énergie, batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable et peut être supportée par les cellules solaires.

1.2.2.2 Architecture logicielle

Les systèmes d'exploitation légers comme TinyOS [7] ou Contiki [8] sont nécessaires en raison de la contrainte énergétique des capteurs. Cependant, TinyOS est toujours le plus utilisé et le préféré des RCSF. Il est gratuit et est utilisé par une grande communauté de scientifiques pour développer et tester des algorithmes et des protocoles réseau dans les simulations.

1.3 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

1.3.1 Définition d'un RCSF

Un réseau sans fil de capteurs est une collection de nœuds. Chaque nœud se compose d'une unité de traitement (un ou plusieurs microcontrôleurs, CPU), peut contenir plusieurs types de mémoire (RAM, disque durs et mémoires Flash), doter d'un émetteur/récepteur et une source d'énergie (par exemple, des batteries et des piles solaires). Les nœuds de ces réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome, dispersés aléatoirement à travers une zone géographique (champ de captage) et mettant en œuvre un routage multi saut jusqu'au nœud considéré comme un « point de collecte » appelé puits (sink). Les RCSFs se composent de nœuds de capteurs qui doivent coopérer à l'exécution d'une fonction spécifique.

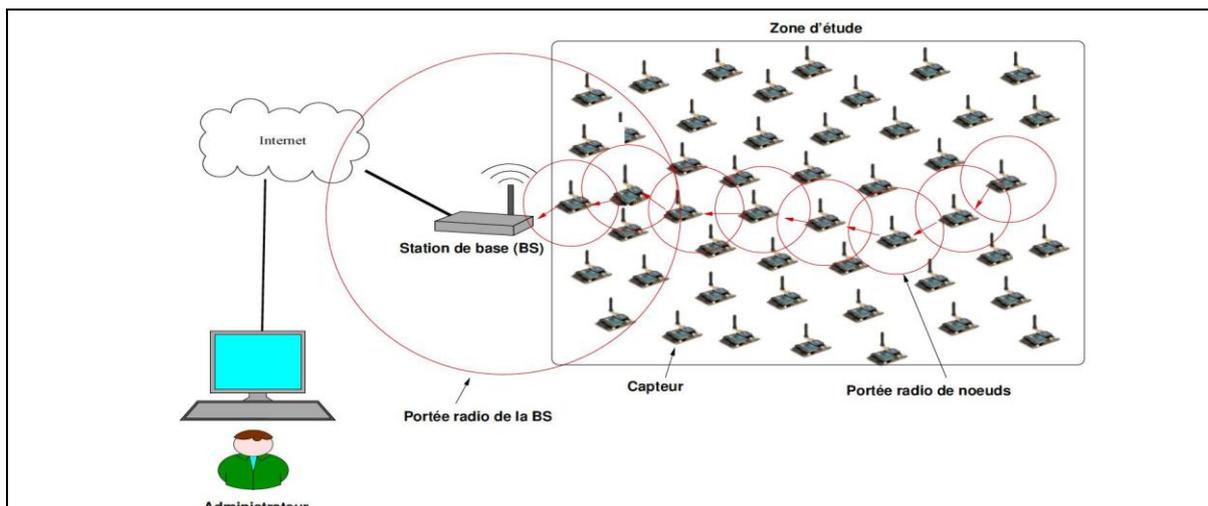


Figure 1.3: Exemple de réseau de capteurs sans fil [10].

En particulier, avec la capacité des nœuds de sentir, traiter et communiquer les données, elles sont bien convenues pour exécuter la détection d'événement, qui est clairement une application en avant des réseaux sans fil de capteurs [9].

1.3.2 Architecture d'un RCSF

Un RCSF consiste en un grand nombre de capteurs (des centaines voire des milliers) déployés en densité dans un terrain d'intérêt dit zone de captage. Par l'intermédiaire d'un routage multi-sauts, ces capteurs peuvent collecter des données sur le phénomène surveillé et les transmettre à un nœud spécifique appelé « puits » ou « station de base ». Ensuite, il envoie les données recueillies via Internet ou par satellite à un ordinateur appelé « Gestionnaire de tâches », qui est accessible par l'utilisateur. (Voir la Figure 1.4) [11].

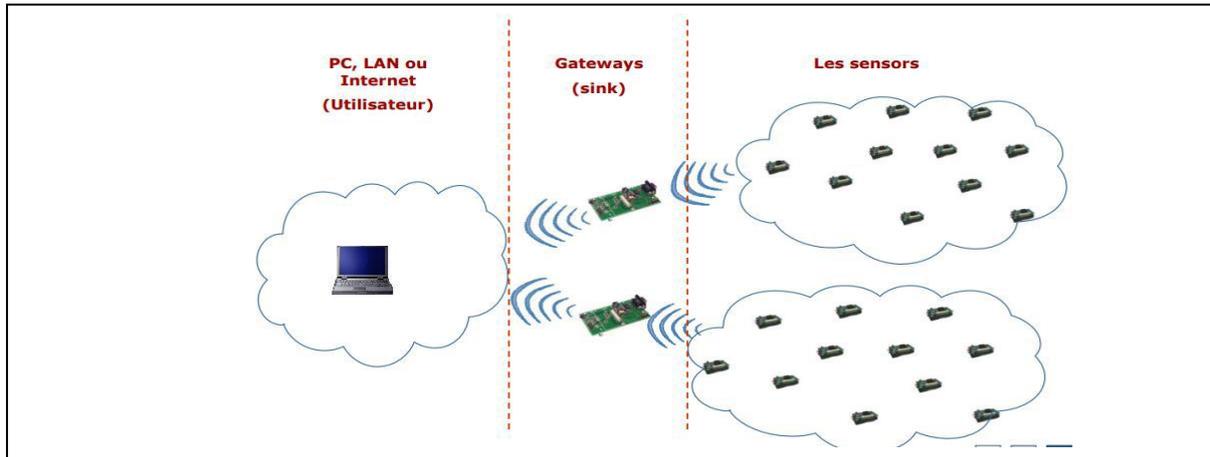


Figure 1.4 : Architecture d'un RCSF [12].

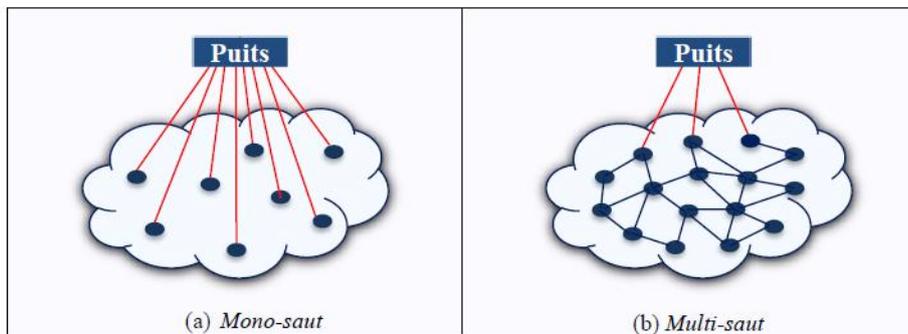


Figure 1.5: Architecture plate d'un RCSF [23]

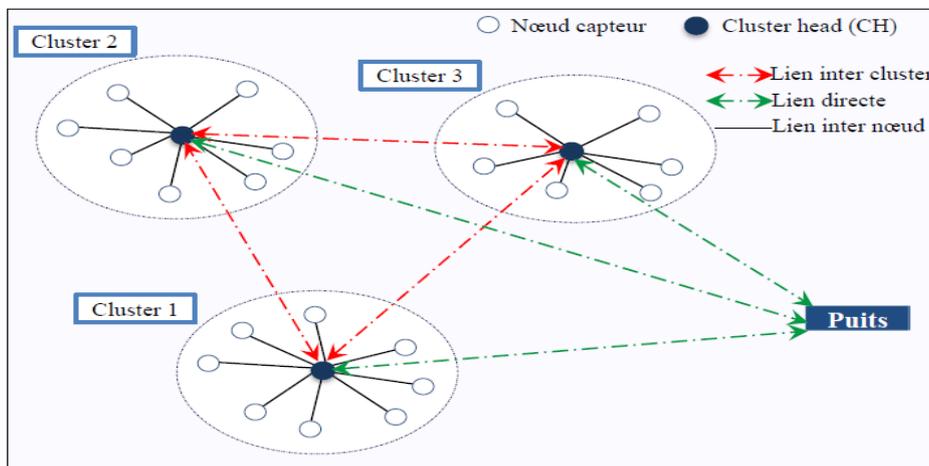


Figure 1.6: Architecture hiérarchique à base de clusters d'un RCSF [23]

En fonction de la façon dont les nœuds capteurs communiquent entre eux, l'architecture d'un RCSF peut être divisée en deux architectures distinctes [3] : La première est une architecture plate (voir figure 1.5) où chaque nœud de capteur est identique et a les mêmes capacités de détection. En relayant des données à d'autres pairs, les nœuds capteurs forment des multiples chemins vers le nœud Sink. Cependant, dans l'architecture hiérarchique (voir figure 1.6), les nœuds sont organisés en clusters, avec une tête de cluster qui contrôle chacun. Les données sont transmises par les membres du cluster au chef, La tête de cluster peut avoir une capacité différente par rapport aux autres nœuds. Ces deux architectures ont leurs propres avantages et inconvénients.

1.3.3 Les différents types d'un RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être classés en deux principales catégories : les réseaux de capteurs mobiles et les réseaux de capteurs statiques. Voici les différents types dans chaque catégorie [13].

1.3.3.1 Les réseaux de capteurs sans fil mobiles

Les RCSF mobiles sont composés de nœuds capteurs mobiles, qui peuvent se déplacer et interagir avec la zone à laquelle ils sont liés. Les nœuds mobiles ont la capacité de s'organiser et de se remettre en place dans le réseau, tout en développant leur capacité de capture, de calcul et de communication. Différents défis se posent à eux, tels que le déploiement, la gestion de la mobilité, la maintenance et la réduction de la consommation d'énergie. Ces RCSF mobiles offrent de nouvelles possibilités d'utilisation.

1.3.3.2 Les réseaux de capteurs sans fil statiques

Ce sont des réseaux dans lesquels les nœuds capteurs sont déployés de manière fixe et ne bougent pas de leur position initiale. Voici quelques types de réseaux de capteurs sans fil statiques:

- **Réseaux de capteurs terrestres:** ce sont des réseaux où les capteurs sont déployés sur le sol pour surveiller différents paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité du sol, les niveaux de pollution, etc.
- **Réseaux de capteurs sous-marins:** Ces réseaux comprennent des nœuds capteurs déployés sous l'eau dans les océans, les rivières ou les lacs pour surveiller divers paramètres aquatiques comme la température, la salinité, les courants, etc.

1.3.4 La pile protocolaire dans un RCSF

Ce modèle sert à standardiser la communication entre les parties du réseau afin que divers constructeurs puissent créer des produits compatibles, qu'ils soient logiciels ou matériels. Ce modèle comprend cinq couches qui exécutent les mêmes tâches que le modèle OSI, ainsi que trois couches pour la gestion de l'énergie, de la mobilité et des tâches (interrogation du réseau de capteurs).

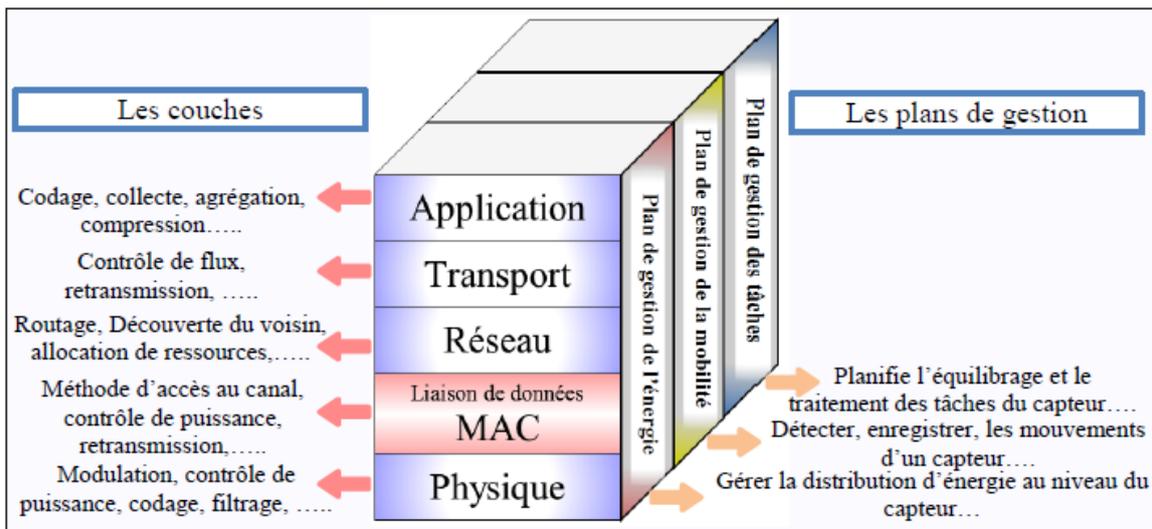


Figure 1.7: La pile protocolaire des RCSF [23].

Un système en couches divise un problème en différentes parties (couches) en fonction de son niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche supérieure ou inférieure. De cette manière, chaque couche reçoit les services des couches inférieures et les transmet aux couches supérieures [12].

1.3.4.1 Les différentes couches

1 La couche physique

Cette couche assure la liaison entre la pile protocolaire et la partie matérielle de communication réseau. Elle permet le passage des bits qui composent la trame de la couche liaison de données à travers le support réseau. Une série de signaux transmis au support local de la couche liaison de données et du code est acceptée par cette couche. Un dispositif final ou intermédiaire reçoit les bits codés d'une trame [14].

2 La couche liaison de données

Cette couche est généralement responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et du verrouillage des trames de données, du contrôle d'accès au média (MAC : contrôle d'accès au média) et du contrôle des erreurs. Elle garantit une connexion fiable (point à point ou point à plusieurs points) en fonction de la topologie du réseau de capteurs.

Les protocoles de liaison de données comprennent EAR (Eavesdrop and Register) et SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks). [15].

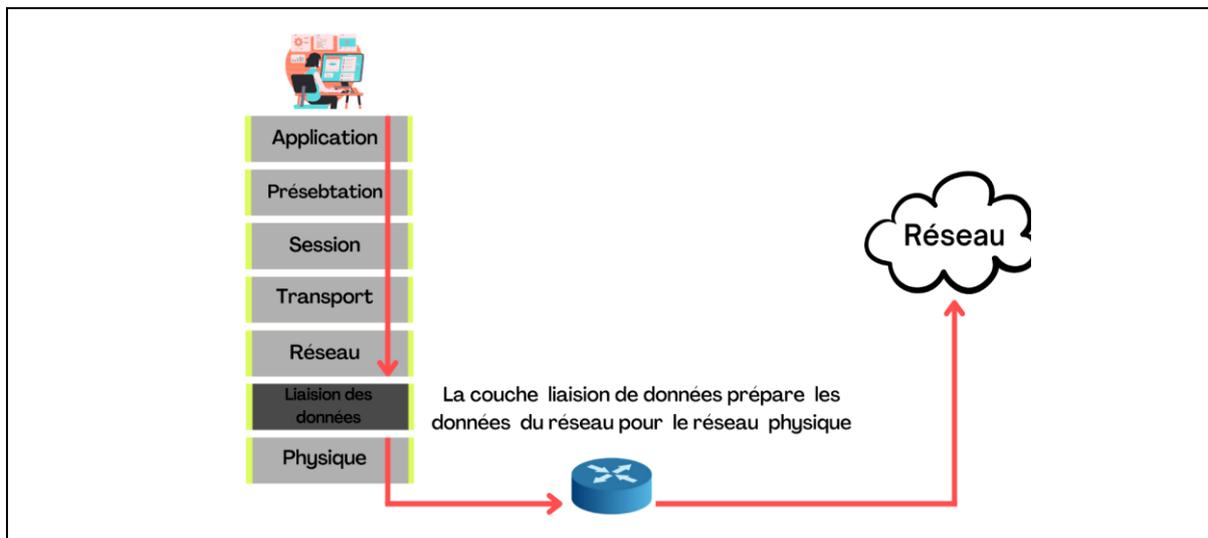


Figure 1.8: Le rôle de la couche liaison de données [15].

3 La couche réseau

Elle s'occupe du routage de données fournies par la couche transport. Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie, délai de transmission, débit, etc. Les protocoles de routage conçus pour les RCSF sont différents de ceux conçus pour les réseaux Ad Hoc puisque les RCSF sont différents selon plusieurs critères comme :

- l'absence d'adressage fixe des nœuds tout en utilisant un adressage basé-attribut.
- l'établissement des communications multi-sauts.
- l'établissement des routes liant plusieurs sources en une seule destination pour agréger des données similaires, etc. Parmi ces protocoles, nous citons : LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) et SAR (Séquentiel Assignment Routing).

4 La couche application

La couche application, qui est gérée directement par les logiciels, est le niveau le plus proche des utilisateurs. Elle regroupe toutes les utilisations effectuées sur un RCSF. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le RCSF à travers diverses interfaces et, éventuellement, à travers un réseau étendu. SMP (Protocole de gestion des senseurs) et TADAP (Protocole de répartition des tâches et de publicité des données) sont quelques-uns des protocoles d'application [15].

1.3.4.2 Les différents plans de gestion

Au sein d'un nœud de capteur, les plans de gestion de l'énergie, de la mobilité et de la tâche contrôlent l'énergie, le mouvement et la distribution de la tâche aident les nœuds capteurs à organiser leur travail de captage et à réduire leur consommation d'énergie. Ainsi, il est essentiel que les nœuds capteurs travaillent ensemble, transportent les données dans un réseau mobile et échangent efficacement les ressources entre eux. Par conséquent, la durée de vie du réseau peut être prolongée [16].

1 Plan de gestion de l'énergie

Ce niveau est responsable de la façon dont les nœuds consomment de l'énergie, car la durée de vie des batteries détermine la durée de vie des nœuds. Par exemple, un nœud peut désactiver son interface après avoir reçu un message afin d'éviter de dépenser de l'énergie inutile.

2 Plan de gestion de mobilité

Enregistre et détecte le mouvement du nœud capteur. Par conséquent, un retour utilisateur est toujours maintenu et le nœud peut surveiller ses nœuds voisins. Les nœuds capteurs peuvent balancer l'utilisation de leur énergie et la réalisation de tâches en déterminant leurs voisins [16].

3 Plan de gestion des tâches

Balace et organise les différentes opérations de collecte de données dans une zone donnée. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de captage au même moment; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres en fonction de leur niveau de batterie [16].

1.3.5 Les contraintes d'application des RCSF

1.3.5.1 L'efficacité énergétique

Dans la conception des protocoles de réseaux de capteurs, l'efficacité énergétique est l'une des exigences fortes. Par conséquent, prolonger la durée de vie de chaque nœud devient un objectif majeur afin de garantir une durée de vie plus longue pour le réseau dans son ensemble. [17].

1.3.5.2 La scalabilité (le passage à l'échelle)

La mise en place d'un plan de déploiement efficace en tenant compte de la densité importante est essentielle pour que le réseau fonctionne correctement.

Il est utilisé pour déterminer précisément la densité, le rayon d'émission et le nombre moyen de nœuds adjacents à un nœud. Les topologies sont des contraintes auxquelles les applications doivent répondre lorsque de nouveaux capteurs rejoignent ou quittent le réseau, ce qui entraîne des changements de densité [18].

1.3.5.3 La latence

La latence est le temps moyen entre l'envoi d'une information par une source et sa réception par une destination. Elle inclut les délais de transmission et de propagation dans la file d'attente du capteur ou du point de collecte. Avant le premier créneau de la trame, chaque nœud de transmission lance une requête pour envoyer un paquet de données au puits, ce créneau étant considéré comme le temps de référence dans le calcul du retard. La communication multi-sauts peut économiser beaucoup d'énergie en réduisant le temps et le nombre de sauts [19].

1.3.5.4 Le débit

Le débit est une mesure de performance que tous les réseaux utilisent. Un débit plus élevé est nécessaire pour certaines applications que pour d'autres. Cette métrique démontre que le réseau peut envoyer des informations au point focal en permanence. La latence, l'utilisation des canaux et l'efficacité du mécanisme sont quelques-uns des nombreux facteurs qui ont un impact sur le débit [19].

1.3.5.5 L'équité dans le partage du canal

L'équité du partage des canaux signifie que différents utilisateurs, systèmes d'exploitation ou applications du réseau peuvent partager les canaux de manière équitable et juste. Dans les réseaux de capteurs, tous les nœuds peuvent jouer des rôles différents et travailler ensemble pour atteindre un objectif commun. C'est pourquoi un nœud doit toujours envoyer plus de données qu'un autre. Par conséquent, l'équité du partage de canaux est moins limitée aux applications de capteurs où les performances globales sont davantage basées sur le partage de charge entre différents nœuds que sur le partage de canaux [20].

1.3.6 Les domaines d'application des RCSF

La diminution de la taille et du coût des micro-capteurs, la diversité des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) et l'évolution des supports de communication sans fil ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs.

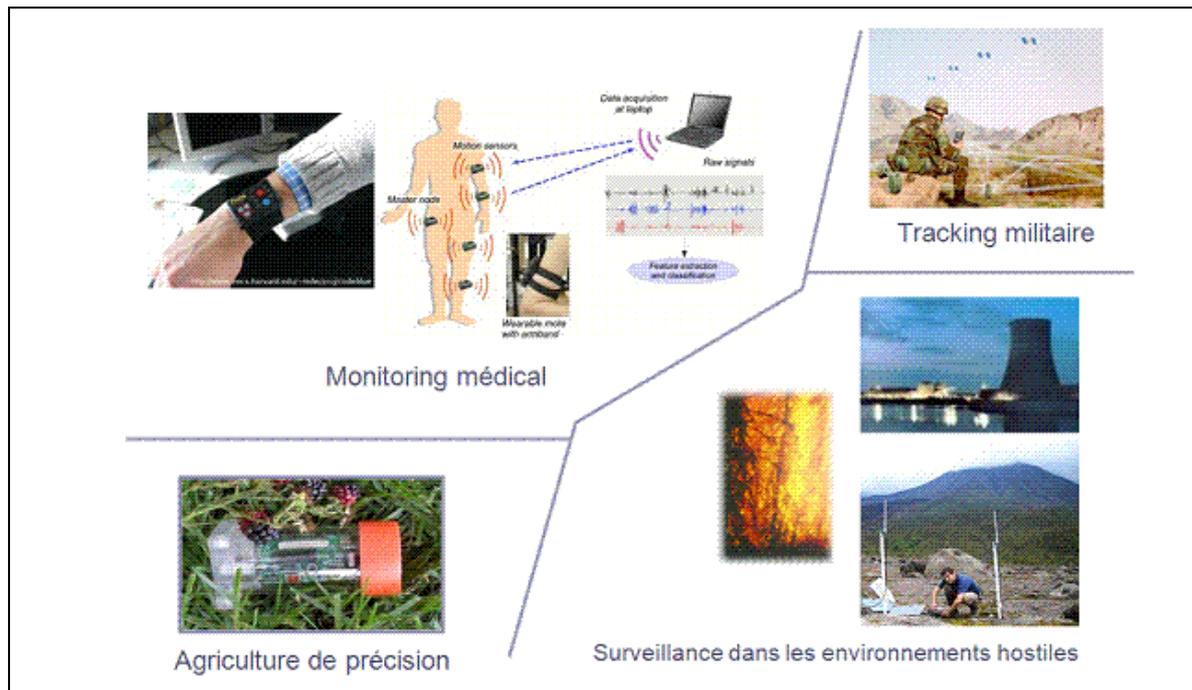


Figure 1.9 : Applications des RCSF [12].

Ils permettent également d'enrichir les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage, ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes provenant de l'environnement (météorologie, étude des courants, de l'acidification des océans, de la dispersion de polluants, de propagules, etc. [23]. Les réseaux de capteurs pourraient révolutionner la manière même de comprendre et de construire des systèmes physiques complexes, notamment dans les domaines militaires, environnementaux, domestiques, sanitaires et de sécurité.

1.3.6.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs ont commencé dans le domaine militaire, comme dans d'autres technologies. Ce type de réseau est un outil appréciable dans un tel domaine en raison de son déploiement rapide, de son coût réduit, de son auto-organisation et de sa tolérance aux pannes. Il est possible de surveiller tous les mouvements dans un secteur stratégique ou difficile d'accès en installant un réseau de capteurs. L'armée américaine aurait déjà mené des tests concluants dans le désert de Californie [5].

1.3.6.2 Applications environnementales

Pour les applications de soins de santé, les capteurs prennent en charge une interface pour les personnes handicapées, la surveillance intégrée des patients, le diagnostic et l'administration de médicaments en milieu hospitalier, la surveillance à distance des données physiologiques humaines et le suivi et la surveillance des patients hospitalisés.

Il traite certaines maladies dans le corps. La création d'une rétine artificielle avec 100 micro-capteurs pour corriger la vision est un exemple de projet [6].

1.3.6.3 Applications médicales

Grâce à l'utilisation de micro-capteurs avalés ou implantés sous la peau, il serait possible de surveiller les fonctions vitales d'une personne. Actuellement, il existe des micro-caméras avalables. Avec une autonomie de 24 heures, elles sont capables de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain sans avoir recours à la chirurgie.

1.3.6.4 Applications commerciales

Les nœuds capteurs peuvent améliorer le processus de stockage et de livraison, en particulier pour garantir la chaîne froide. Le réseau créé ainsi peut être utilisé pour déterminer l'emplacement, l'état et l'orientation d'un colis ou d'une cargaison. Les clients qui attendent un colis recevront des notifications de livraison en temps réel et seront informés de son emplacement. Un réseau de capteurs permet aux fabricants de suivre le processus de production depuis les matières premières jusqu'au produit final livré. Les entreprises peuvent offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant les coûts grâce aux réseaux de capteurs. Le produit utilisé peut être mieux démonté et recyclé ou réutilisé si le micro capteur garantit un bon état. Grâce à des micro capteurs sur les carreaux de sol tels que les murs, les cadres de porte et les meubles, les systèmes domotiques pour le chauffage et le refroidissement, l'éclairage et la distribution d'eau dans les bâtiments peuvent optimiser l'efficacité. Le système ne fonctionne qu'en cas de besoin et à une échelle appropriée. Les utilisations à grande échelle de telles applications réduiront la demande d'énergie dans le monde et réduiront les émissions de gaz à effet de serre indirectement. Ces économies représentent une perte annuelle de 55 milliards de dollars aux États-Unis, réduisant ainsi les émissions de CO₂ dans l'atmosphère de 35 millions de tonnes. Ainsi, l'impact environnemental sur le climat peut être réduit par la communauté des affaires [6].

1.3.7 La connectivité dans les RCSF

Un RCSF est connecté s'il existe au moins un chemin entre chaque paire de nœuds. Dans un réseau de k-connectivité ($k \geq 1$), il existe au moins k chemins disjoints entre toute paire de nœuds. Le rayon de communication (r_c) doit être ≥ 2 fois le rayon de détection (r_s) et la région de détection doit être convexe. La k-couverture implique la k-connectivité [22]. En résumé, une couverture complète garantit une connectivité totale (Figure 1.10). Dans [22], la condition de connectivité pour une couverture est $r_c \geq 2r_s$, où $x = r_c/r_s$. x peut être 1. Si la plage de transmission des capteurs est supérieure à deux fois la plage de détection, alors la

couverture implique la connectivité. Dans la figure 1.10, le capteur s_1 détecte la région grise (rayon de détection r_s) et le rayon de communication r_c est deux fois plus grand que la zone avec des points. La connectivité dans les RCSF est essentielle pour assurer les fonctionnalités des applications. Il est donc crucial de considérer les propriétés de connectivité lors de la conception et du déploiement des réseaux.

1.3.8 La couverture dans les RCSF

Dans les RCSF, la couverture est essentielle pour mesurer la performance en termes de surveillance et de contrôle d'une zone donnée. Elle indique comment les nœuds surveillent et suivent chaque point de la zone de surveillance. Cette zone est représentée par un cercle de rayon r . Le nœud a une vision dépendante du rayon de réception de son module de communication r_s . Un nœud ne peut communiquer que s'il est dans sa zone de communication. Si les nœuds peuvent communiquer directement ou indirectement, on dit qu'un réseau est connecté. Un exemple de la zone de couverture d'un capteur est représenté à la figure 1.10 [23].

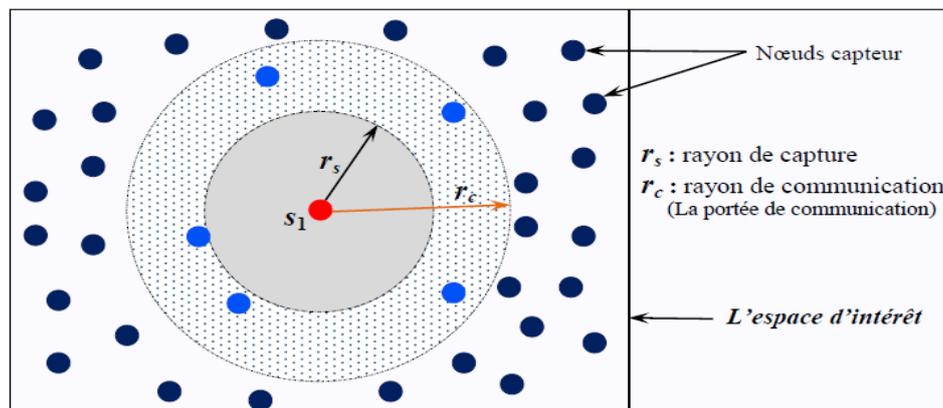


Figure 1.10 : Les différents rayons d'un nœud capteur [23].

La couverture d'un RCSF mesure le degré de couverture de l'espace d'intérêt par les nœuds capteurs. Il existe trois types de couverture : partielle, dense et redondante. Un mauvais déploiement peut entraîner la perte de nœuds isolés.

Une meilleure couverture est donc essentielle pour des systèmes robustes et pour prolonger la durée de vie du RCSF en mettant en mode veille les nœuds redondants à faible consommation d'énergie.

1.3.9 La durée de vie d'un RCSF

La durée de vie des réseaux de capteurs sans fil dépend directement du facteur de l'énergie des nœuds capteurs, qui est probablement la caractéristique la plus pénalisante. Par

le but de maximiser la durée de vie d'un RCSF, on doit minimiser l'énergie consommée par ses dispositifs. Normalement, la durée de vie de tout RCSF est supposée être la durée entre son déploiement et le moment où le réseau devient non fonctionnel. Ainsi, de nombreuses définitions de la durée de vie du RCSF existent dans la littérature, certaines d'entre elles sont indiquées de manière brève ci-dessous: [21]

1. le moment où une certaine partie de nœuds meurt ;
2. le moment où le chef de la première grappe (cluster) meurt ;
3. l'heure à laquelle tous les nœuds meurent dans le réseau ;
4. l'heure à laquelle le réseau se divise en deux segments ou plus ;
5. la connectivité et la couverture du réseau sont perdues ;
6. l'heure à laquelle chacune des cibles n'est pas couverte par au moins un ou K nœuds
7. l'heure à laquelle le réseau n'est pas en mesure de fournir des tâches spécifiques à l'application, Etc.

1.3.10 Les sources de consommation d'énergie dans les RCSF

Plusieurs éléments influencent la puissance de communication du nœud, tels que le type de schéma de modulation utilisé, le débit de données, la puissance de transmission, les modes de fonctionnement de la radio et la fréquence de commutation entre ces modes. Parallèlement, un protocole de routage peut avoir une responsabilité pour les différentes sources de gaspillage d'énergie dans les RCSF, principalement liées à la communication [3].

a. Réception indésirable ou écoute abusive (overhearing) : les nœuds voisins reçoivent des paquets qui ne leur sont pas destinés, gaspillant ainsi de l'énergie.

b. Collisions : lorsque deux nœuds transmettent en même temps, cela augmente la consommation d'énergie et nécessite des retransmissions.

c. Écoute à vide (idle listening) : le maintien du mode d'écoute pour recevoir d'éventuels paquets est très coûteux, surtout dans les réseaux à faible trafic.

d. Non disponibilité du récepteur ou l'envoi est infructueux (L'overmitting (overmitting): l'émetteur consomme de l'énergie pour envoyer des données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir.

e. Paquets de contrôle (over head) : l'utilisation de paquets de contrôle réduit le débit utile et dégrade le niveau d'énergie du réseau.

1.4 Conclusion

Tout au long de ce chapitre nous avons tenté de présenter les RCSF : les généralités, les architectures, leurs différents types ainsi que la pile protocolaire utilisée. Nous avons ensuite présenté les différentes limitations de ce type de réseau, les domaines d'application, la connectivité et sa durée de vie. Nous décrivons également les différentes sources de consommation d'énergie dans les RCSF. Dans le prochain chapitre, nous présenterons le protocole de routage hiérarchique LEACH.

Chapitre 2

«Le protocole de routage hiérarchique LEACH»

2.1 Introduction

Les protocoles de routage jouent un rôle déterminant et crucial dans la conception des RCSF, et sont influencés par un facteur déterminant à savoir la consommation d'énergie sans perte d'efficacité. De nombreuses stratégies de routages ont été créées pour les RCSF. Certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux (Principalement pour les réseaux sans-fil au sens le plus large) tandis que d'autres ont été conçues spécialement pour les RCSF.

Dans ce chapitre nous décrivons le protocole de routage LEACH, et nous allons présenter les différentes phases utilisées par de ce dernier, leurs avantages, leurs inconvénients et leurs limitations.

2.2 Le protocole de routage hiérarchique

2.2.1 Définition de routage

Le routage est un processus qui permet de sélectionner le meilleur chemin dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. On distingue généralement deux entités : L'algorithme de routage et le protocole de routage. Dans les réseaux de capteurs, les différentes caractéristiques comme la densité importante des nœuds, leurs autonomies énergétiques limitées et la topologie qu'ils forment exigent des protocoles de routage spécifiques. De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère indispensable. Ces protocoles doivent tenir compte de l'aspect fonctionnel de ces réseaux tout en optimisant les calculs nécessaires pour choisir le meilleur chemin [12].

2.2.2 Protocoles de routage hiérarchiques

La plupart des protocoles de routage utilisés dans les RCSF sont des protocoles hiérarchiques. On considère ces protocoles comme l'approche la plus bénéfique en matière d'efficacité énergétique, en particulier dans les réseaux de capteurs à grande échelle. Le routage hiérarchique permet de partitionner le réseau en sous ensemble pour faciliter la gestion du réseau ce qui permet une meilleure conservation de l'énergie, Le partitionnement du réseau permet d'organiser le réseau de telle sorte que chaque sous ensemble de nœuds a un super nœud appelé cluster-head. Ce dernier gère cet ensemble de nœuds et communique avec d'autres cluster-heads [24].

2.3 Le protocole *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH)

2.3.1 Description Du protocole LEACH

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) est le plus populaire des protocoles de routage hiérarchique, introduit par Heinzelman et Al. Ce protocole se base sur la clustérisation dynamique. Il a été l'un des premiers protocoles hiérarchiques basé sur la notion de « cluster » ou grappe implémenté pour les RCSF qui partitionne ce dernier en (groupes) clusters comprenant deux niveaux : les chefs de groupe (cluster-heads) et les nœuds membres. Il est également considéré comme la base des autres protocoles de routage hiérarchique. Dans chaque cluster, le nœud Cluster-Head (CH) a des privilèges supplémentaires, qui est le responsable dans la création du cluster et de la manipulation de données à transmettre en utilisant le TDMA (Time Division Multiple Access) et il envoie ces données agrégées à partir des nœuds à la station de base où ces données sont nécessaires en utilisant CDMA (Code Division Multiple Access). Les nœuds restants sont des membres de cluster [25].

• L'accès multiple par répartition temporelle (TDMA)

Une méthode utilisant un multiplexage temporel dans LEACH pour accéder au média. Pendant son laps de temps, chaque nœud utilise l'intégralité de la bande passante attribuée par le système de transmission. En réalité, chaque CH joue le rôle d'un centre de commande local afin de contrôler les transmissions des données en envoyant par avance la table TDMA aux membres de leur cluster. Ainsi, chaque membre du cluster est informé à l'avance du temps qu'il va occuper, ce qui permet au nœud de passer à l'état "veille" pendant les temps inactifs. De cette façon, on évite la perte d'énergie [26].

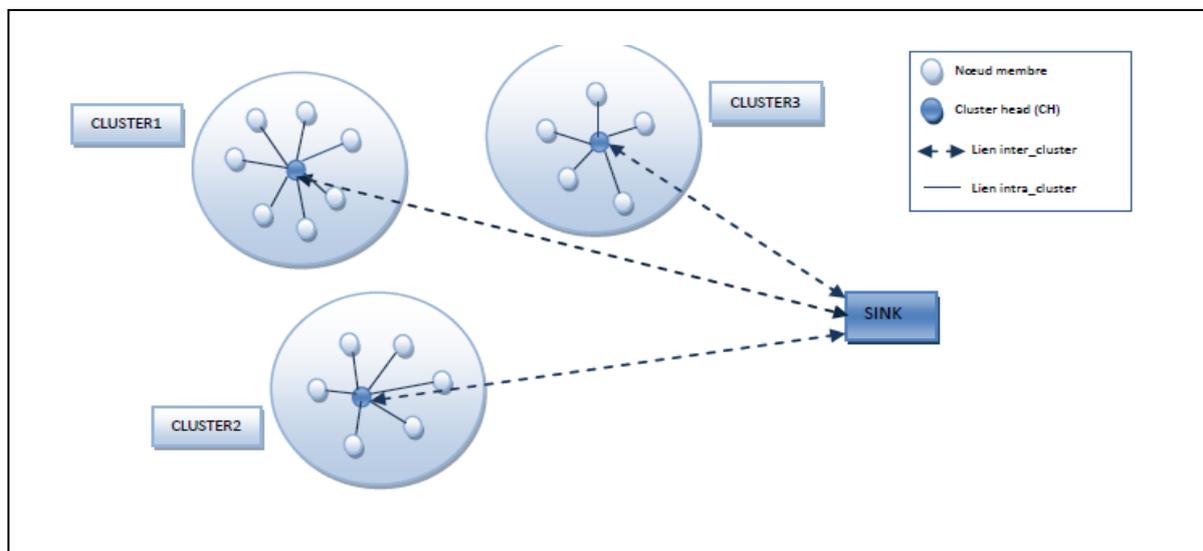


Figure 2.1: Le principe du protocole LEACH [29].

• L'accès multiple par répartition de codes (CDMA)

Le principe du spectre étalé est utilisé dans la technique CDMA, où chaque cluster-head sélectionne aléatoirement un code parmi une liste de codes de propagation CDMA afin d'éviter les interférences avec les CHs lors de l'envoi des données agrégées à la station de base [27].

2.3.2 L'objectif du protocole LEACH

Le protocole de routage hiérarchique LEACH vise principalement à réduire de manière efficace la consommation d'énergie des nœuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-saut au sein d'un cluster, tout en effectuant l'agrégation et la fusion des données pour réduire le nombre de messages transmis à la destination. En général, la création de clusters repose sur la capacité d'énergie des capteurs et sur les capteurs situés à proximité du centre de cluster [30].

2.3.3 Le principe de base du protocole LEACH

LEACH repose sur la division du réseau en deux niveaux : les cluster-heads ou les chefs de groupe et les nœuds membres. Il a pour mission de recueillir les données enregistrées par ses membres et de les transmettre à la station de base, ainsi qu'aux nœuds membres ou générales. La rotation randomisée est utilisée dans le protocole LEACH pour choisir les CH, afin d'assurer une répartition uniforme de la charge énergétique entre tous les nœuds du réseau, et se déroule en rounds. Les deux phases de chaque round sont la configuration et la transmission [31].

2.3.4 Les différentes phases du protocole LEACH

LEACH s'exécute en deux grandes phases : la phase de configuration du cluster, « set-up phase » et la phase de transmission « steady-phase ».

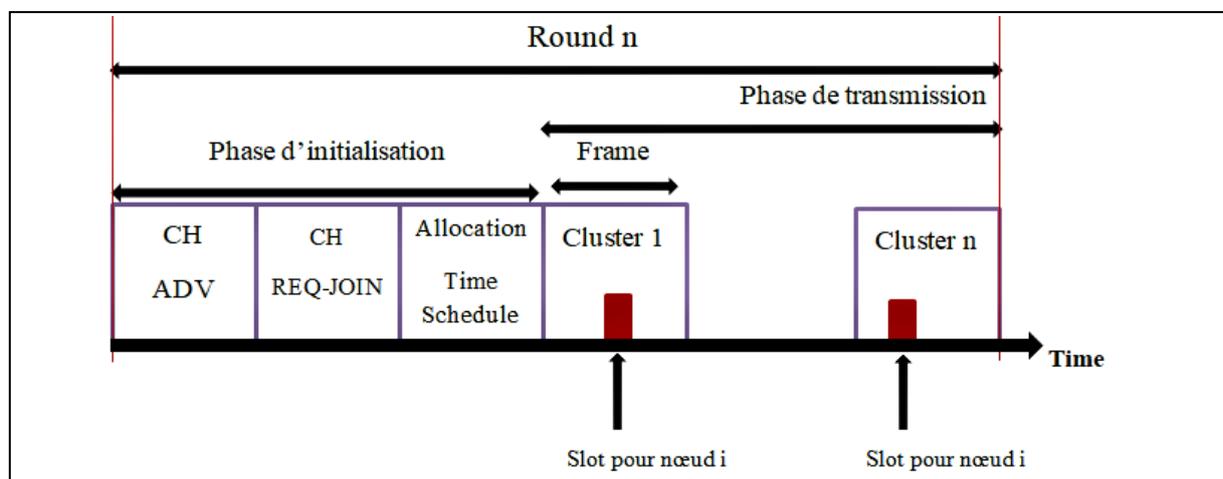


Figure 2.2 : Les différentes phases utilisées par le protocole LEACH [26].

2.3.4.1 La phase de configuration du cluster (set-up phase)

Lors de la phase de configuration « set-up phase », les nœuds cluster-head sont élus et les clusters sont formés. L'élection des cluster-heads se déroule comme suit : chaque nœud choisit un nombre de manière aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à une valeur $T(n)$, le nœud devient cluster-head. La valeur de $T(n)$ est définie comme suit [31]:

$$T(n) = \frac{p}{1 - p * \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} \quad \text{Si } (n \in G) \tag{1}$$

Si non 0

Avec :

P : est le pourcentage de clusters souhaité par exemple (5%).

n : numéro d'un nœud donné.

r : est le round courant.

G : représente l'ensemble des nœuds qui n'ont pas encore été élus comme cluster-head sur les $\frac{1}{p}$ derniers rounds.

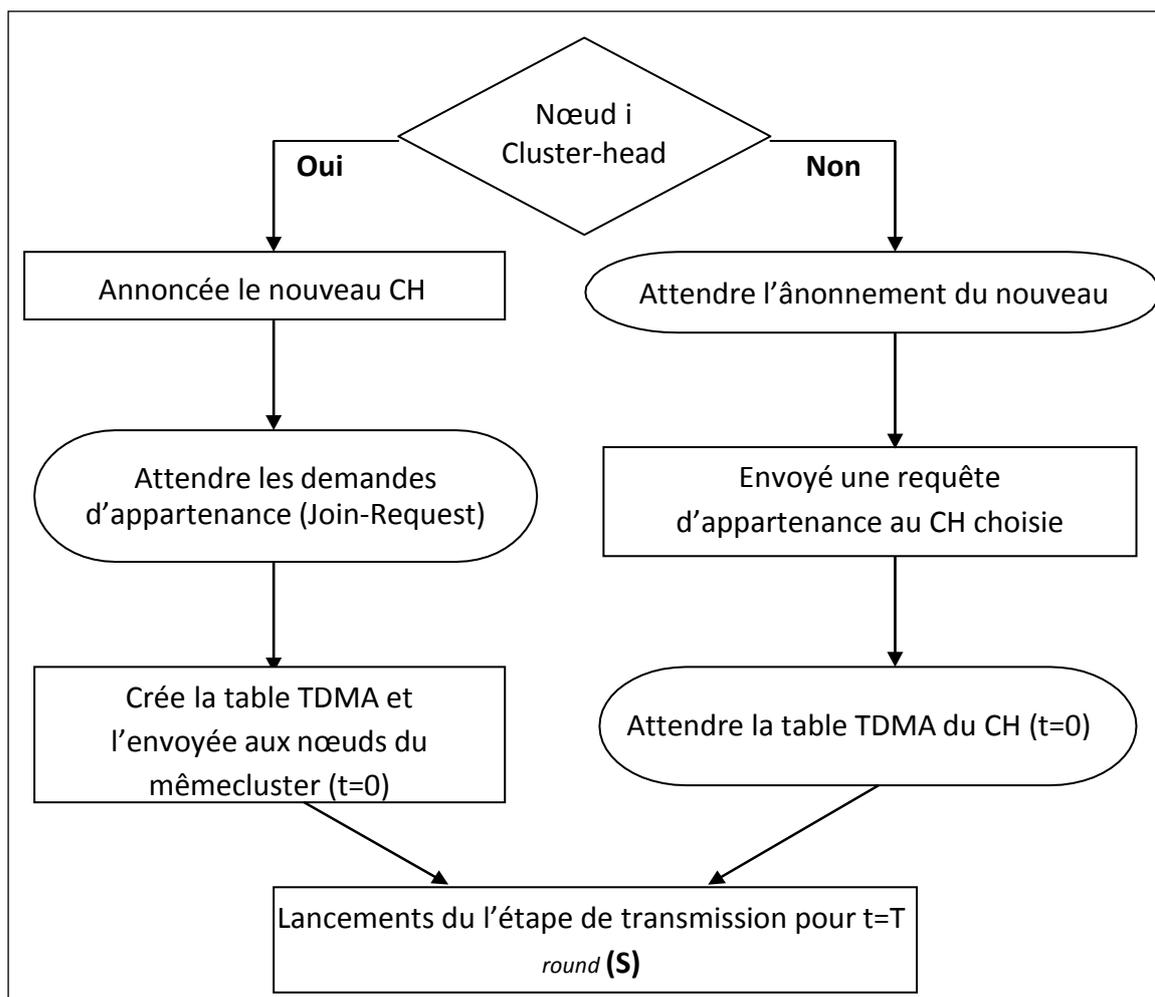


Figure 2.3: L'organigramme de la phase d'initialisation (set-up) [26].

Chaque CH élu émet un message de signalisation (ADV-CH ("Advanced Cluster Head")) au reste des nœuds dans le réseau. Dans ce message il annonce qu'il a été élu CH pour cette période. Tous les nœuds membres ou générales (GN) non affilié recevant ce message envoient une demande d'adhésion au cluster-head correspondant. Le choix du cluster-head est basé sur la puissance du signal reçu.

Par la suite, chaque nœud non-CH informe le CH du cluster choisi par l'envoi d'une requête d'appartenance (JOIN-REQ). Après la réception des messages de joindre de tous les membres du cluster, le CH crée une suite temporelle (table TDMA), afin d'allouer à chaque nœud membre de cluster le slot de temps approprié quand il peut transmettre. La figure 2.3 illustre un diagramme qui résume la première phase de l'algorithme [32]:

2.3.4.2 La phase de transmission de données (steady state phase)

En utilisant le Schedule TDMA, Chaque nœud membre (non-CH) dans le cluster transmet les données collectées à son CH. Et après le CH effectue une opération d'agrégation puis une autre opération de compression de toutes ces données réceptionnées afin de l'envoyer à la station de base (sink) [31].

Après un intervalle de temps donné, une rotation randomisée du rôle du CH est conduite de sorte que la dissipation uniforme d'énergie dans le réseau de capteurs soit obtenue. En outre, LEACH utilise la technique de multiplexage CDMA pour que les CH envoient les données à la station de base, où la communication inter-cluster aura lieu. La communication peut être directe (un seul saut) ou indirecte (multi-sauts). Un nouveau round aura lieu après la fin de cette phase, ce processus est répété jusqu'à ce que tous les nœuds du réseau soient élus comme CH, une seule fois, tout au long des rounds précédents. Dans ce cas, le round est réinitialisé à 0 [32].

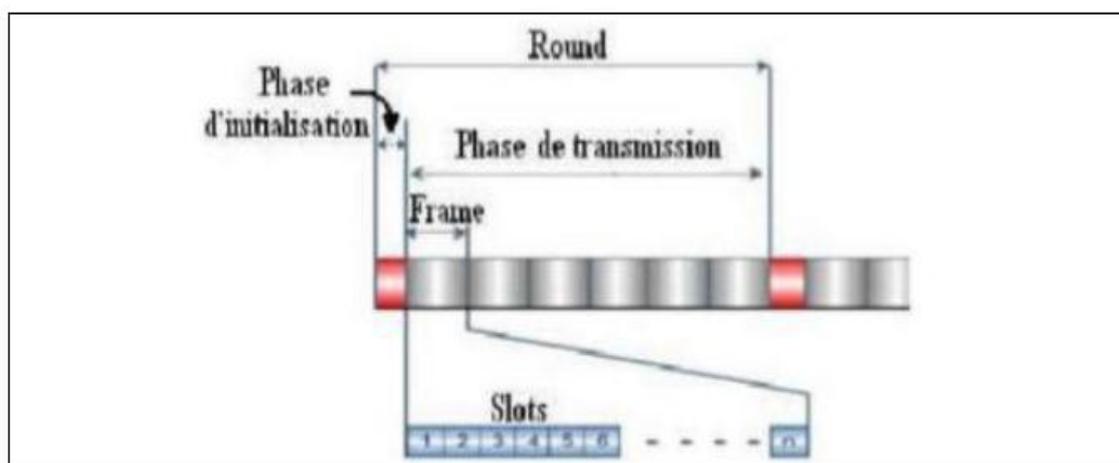


Figure 2.4 : La répartition du temps utilisée dans la phase de transmission [26].

La figure 2.5 illustre un diagramme qui résume la deuxième phase du protocole LEACH:

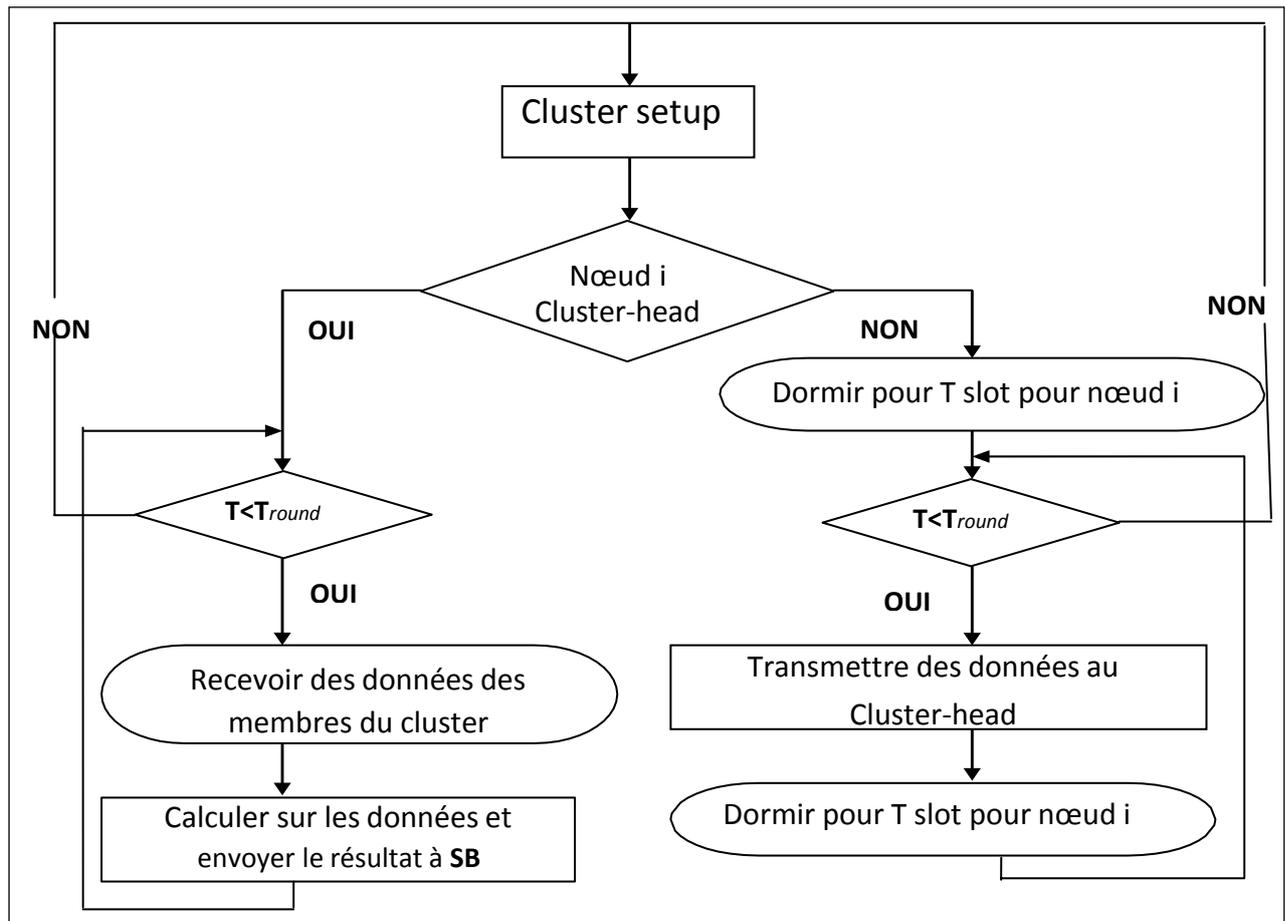


Figure 2.5: L'organigramme de la phase de transmission (steady state phase) [33].

2.3.5 Les avantages du protocole LEACH [27]

- Protocole auto-organisateur basé sur le groupement adaptatif ;
- Rotation des rôles de chefs de groupes;
- Faible énergie pour l'accès au média;
- Compression locale (Agrégation).
- Lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il éteint sa radio pour conserver son énergie.
- L'utilisation des techniques TDMA/CDMA permet d'avoir une hiérarchie et de réaliser des clusterings sur plusieurs niveaux.

2.3.6 Les inconvénients de protocole LEACH [27]

- La possibilité de ne pas avoir des CH durant un round;
- Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches;
- Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station ;

- L'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-sauts diminue l'énergie des nœuds ;
- La rotation des CH n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CH ;
- Il n'est pas évident que les CH soient uniformément distribués ;
- L'apparition des nœuds isolés. Un nœud isolé est un nœud qui ne se trouve pas dans la table TDMA (ne possède pas une tranche de temps (slot time) pour envoyer leur donnée à la station de base). Pour cela ce nœud isolé doit transmettre leurs données directement à la station de base. Cette transmission directe exige une forte consommation d'énergie qui conduit à la diminution de la durée de vie du réseau.

2.3.7 Limitations de protocole LEACH

Le protocole LEACH réduit efficacement la perte d'énergie dans la communication par une rotation aléatoire dans laquelle le nœud de cluster-head tourne entre les différents capteurs afin de répartir la charge d'énergie de manière uniforme et de prolonger la durée de vie du réseau. De plus, LEACH effectue une fusion de données locales pour "compresser" la quantité de données envoyées à partir des clusters à la station de base, ce qui réduit encore la redondance des données. L'utilisation de TDMA / CDMA réduit le conflit au sein du cluster et celui entre les clusters. Ce protocole de routage hiérarchique est une percée par rapport aux protocoles plats. La durée de vie du réseau est prolongée en coupant une partie de l'énergie. Cependant, il existe encore quelques limitations dans LEACH:

1. La sélection de cluster-head est déterminée par un système aléatoire sans tenir compte de l'énergie résiduelle des nœuds, donc une fois qu'un nœud avec moins d'énergie est sélectionné pour être cluster-head, son énergie se dissipera rapidement, puis les nœuds de ce cluster perdront le contact avec son cluster-head et sink.
En d'autres termes, cela accélérera la dissipation d'énergie, raccourcira la durée de vie du réseau et pourrait, au pire, mettre le réseau hors service.
2. LEACH n'a pas précisé comment les nœuds de tête de cluster sont situés dans le réseau. Les résultats de la simulation confirment que tous les cluster-heads peuvent être concentrés dans une certaine partie du réseau, et aucune n'apparaîtra dans d'autres parties.
3. une fois que les nœuds de cluster-head sont déterminés, ils doivent envoyer un

message de publication à tous les autres nœuds de LEACH. Cela signifie qu'une puissance d'émission importante des nœuds de tête de cluster est requise, donc LEACH ne s'applique pas aux réseaux à grande échelle [34].

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté en générale la notion du routage de données, où nous avons exposé en détail le protocole LEACH qui est considéré comme le premier protocole de routage basé sur la notion de cluster pour les RCSF. Dans le chapitre suivant nous allons présenter quelques protocoles de routage hiérarchiques pour les RCSF à récupération d'énergie.

Chapitre 3

*«Les protocoles de routage hiérarchiques pour
les RCSF-RE»*

3.1 Introduction

Les nœuds capteurs des RCSF sont équipés de petites batteries qui ont une durée de vie et un fonctionnement limités. Le remplacement fréquent de la batterie est une solution, mais généralement ce n'est pas pratique. En plus de cela, l'un des principaux objectifs des RCSFs sont de fonctionner de manière autonome, c'est-à-dire sans aucune assistance humaine. L'arrivée récente de la récolte d'énergie pour les RCSFs a amélioré la nécessité de réduire la consommation d'énergie. La récupération d'énergie est le processus de transformation de l'énergie externe (énergie solaire, énergie thermique et champs électromagnétiques) en électricité. Les capteurs peuvent survivre pendant de très longues périodes en utilisant la récupération d'énergie.

Traditionnellement, le point central de tout protocole de routage pour les RCSFs était la conservation de l'énergie afin de maintenir les capteurs opérationnels pendant de plus longues périodes. L'objectif des réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE) (en Anglais EH-WSN : Energy Harvesting Wireless Sensor Networks) est de maximiser l'utilisation de l'énergie disponible (résiduelle) afin d'améliorer les performances du réseau ainsi que leur durée de vie [35].

Dans ce chapitre, nous exposons les principes fondamentaux de la conception du protocole de routage pour les RCSF-RE et examinons l'état de l'art dans ce domaine.

3.2 Définition de la récupération d'énergie (RE)

La récupération d'énergie est la conversion d'énergie d'une forme à une autre. Lorsque les nœuds de capteurs sont utilisés, l'énergie provenant de sources externes peut être récoltée pour alimenter ces nœuds et à son tour, augmenter leur efficacité, leur vie et leur capacité. Les techniques de collecte d'énergie pourraient répondre à une partie ou à la totalité des besoins d'énergie d'un nœud en fonction de son profil d'utilisation d'énergie. La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique est une méthode de collecte d'énergie très répandue et populaire. Bien que l'intensité de la lumière du soleil soit incontrôlable, elle est une source d'énergie prévisible avec des tendances quotidiennes et saisonnières [36].

3.3 Les nœuds de capteur à récupération d'énergie

La récupération d'énergie consiste à exploiter les sources d'énergie faible présentes dans l'environnement. Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, photovoltaïque et éolienne sont des sources très importantes de récupération d'énergie à plus grande échelle, les équipements sans fil se multiplient et la récupération d'énergie est le moyen le plus

écologique de se passer de piles. Les progrès dans les nanotechnologies ont permis de développer des systèmes très petits et sensibles pour récupérer de faibles sources d'énergie, qui sont suffisants pour alimenter de petits capteurs sans fil [37].

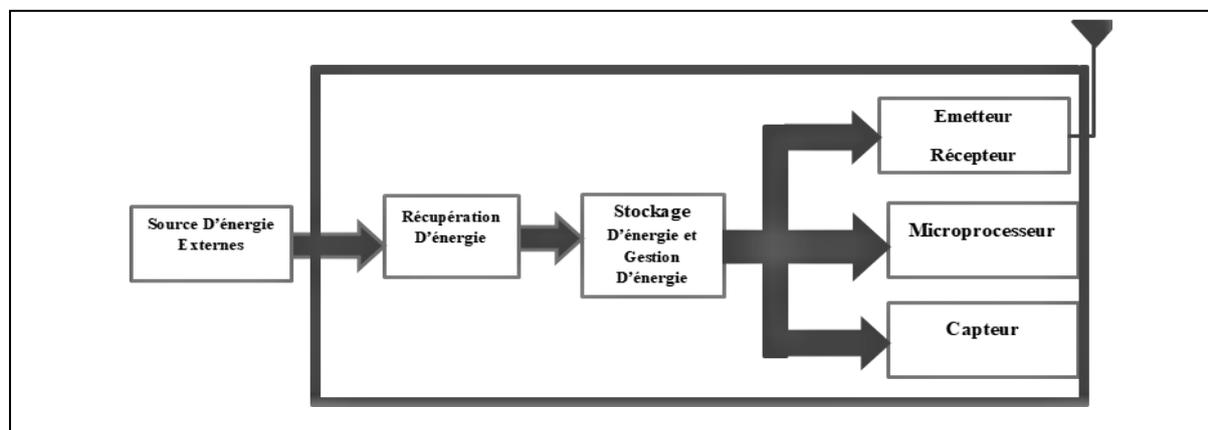


Figure 3.1: Les composants d'un nœud capteur à récupération d'énergie.

D'autres méthodes de production d'énergie transforment l'énergie mécanique ou éolienne en énergie électrique. Ces techniques peuvent être considérées comme des sources d'énergie contrôlables car la quantité d'énergie utilisée pour la conversion peut varier. La source d'énergie, l'architecture de récolte et la charge composent un système de récolte d'énergie typique. La source d'énergie ambiante à collecter est appelée source d'énergie. L'architecture du système de récolte comprend des mécanismes pour exploiter et convertir l'énergie ambiante en énergie électrique. La charge fait référence à une activité qui utilise de l'énergie [38].

3.3.1 Architecture du système de récupération d'énergie

En général, il existe deux architectures distinctes pour les systèmes de récolte d'énergie.

L'architecture Récupérer-Utiliser et l'architecture Récupérer-Recharger-Utiliser

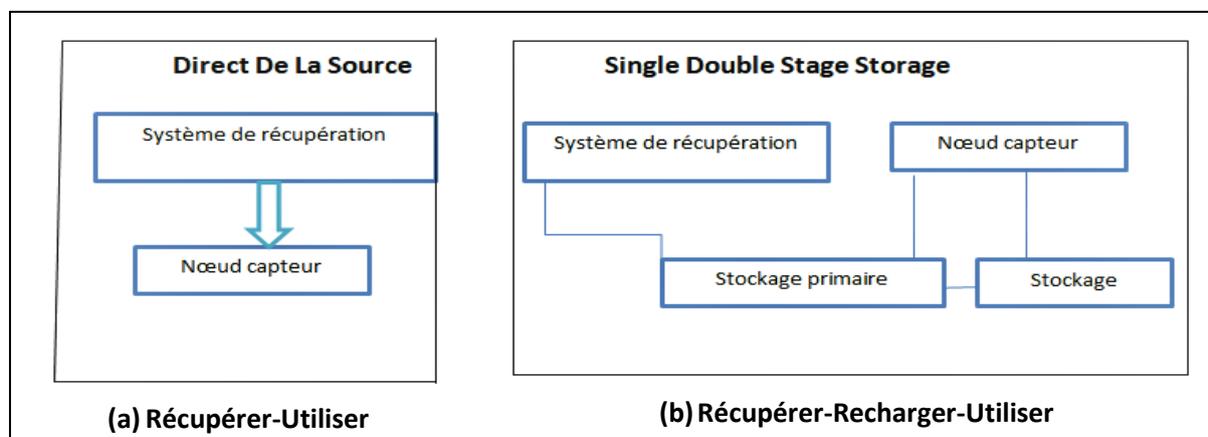


Figure 3.2: Les architectures d'un système à récupération d'énergie .

3.3.1.1 Architecture Récupérer-Utiliser

L'architecture Récupérer-Utiliser est illustrée à la figure 3.2 (a). Dans ce cas, le système de récolte alimente directement le nœud capteur, donc la puissance de sortie du système doit être constamment supérieure au point de fonctionnement minimal pour que le nœud soit opérationnel. Le nœud sera désactivé si une l'énergie suffisante n'est pas disponible. Le nœud capteur oscillera dans les états ON et OFF en raison de variations brusques de la capacité de récolte à proximité du point de puissance minimum [39].

3.3.1.2 Architecture Récupérer-Recharger-Utiliser

L'architecture Récupérer-Recharger-Utiliser est représentée à la figure 3.2(b). L'architecture comprend un composant de stockage qui alimente le nœud du capteur et stocke l'énergie récoltée lorsque plus d'énergie est récoltée que l'utilisation en cours. Lorsque l'occasion de la récolte n'existe pas ou lorsque l'utilisation d'énergie du nœud du capteur doit être augmentée pour améliorer les paramètres de capacité et de rendement, l'énergie excédentaire est emmagasinée pour une utilisation ultérieure. La partie de stockage peut être composée d'un ou deux étages (Batteries). Le stockage secondaire sert de sauvegarde d'énergie récoltée en cas d'épuisement du stockage primaire [40].

3.4 Les sources d'énergie pour la récupération énergétique

Les technologies de récupération d'énergie se sont considérablement améliorées en termes d'efficacité au cours des dernières années, et des appareils capables de générer une puissance continue à partir de diverses sources d'énergie, telles que l'énergie solaire et de vibrations, ont été développés. Nous décrivons les différents types d'énergie qui peuvent provenir de sources radiantes (telles que l'énergie solaire et les ondes de radiofréquence), de sources mécaniques (telles que les vibrations, le vent, le mouvement du corps humain et l'écoulement de l'eau) et de sources thermiques (telles que la différence de température entre deux matériaux conducteurs, les sources de chaleur externes et la friction) [41].

3.5 Les techniques de la récupération énergétique

3.5.1 Récupération de l'énergie mécanique

Les vibrations ambiantes des machines ou le bruit acoustique peuvent produire de l'énergie mécanique, ainsi que les mouvements du corps humain. Selon une estimation des puissances récupérées par les différentes sources d'énergie ambiante, l'énergie des vibrations ambiantes a été classée comme la deuxième source d'énergie avec la plus forte densité de

puissance après l'énergie solaire. Il existe principalement trois méthodes : électrostatique, électromagnétique et piézoélectrique pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les domaines d'application des capteurs sont très variés, notamment dans l'industrie, le transport et la surveillance médicale, en raison de la disponibilité de cette source dans divers contextes [42].

3.5.2 Récupération de l'énergie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque transforme le rayonnement lumineux en énergie électrique. Cette technologie peut être utilisée en extérieur, où les conditions optimales pour le rayonnement solaire peuvent atteindre 1000 W/m², comme en à l'intérieur, où de petits systèmes électroniques peuvent être alimentés par un éclairage artificiel (environ 10 W/m²) [43].

3.5.3 Récupération de l'énergie thermique

Les pertes d'énergie des machines ou des procédés que nous utilisons dans notre environnement humain sont très souvent sous forme de perte de chaleur et génèrent donc des flux thermiques (refroidissement d'un moteur, gaz d'échappement, évacuation de la chaleur de la centrale électrique, etc.). Récupérer cette énergie perdue peut être un moyen d'améliorer la performance du processus ou simplement une opportunité de mettre en place un système autonome [28].

3.5.4 Récupération de l'énergie à partir du corps humain

Sert à convertir la chaleur corporelle en énergie électrique, en plus de l'énergie récupérée à partir de diverses sources biochimiques et biomécaniques du corps humain [44].

3.6 Définition d'un réseau de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE)

Un réseau de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE) est un système de capteurs sans fil composé de nœuds autonomes qui fonctionnent grâce à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Les panneaux solaires, les générateurs éoliens, les capteurs thermiques, les capteurs de vibration ou tout autre dispositif capable de convertir l'énergie ambiante en énergie électrique utilisable font partie de ces sources d'énergie renouvelables. Les nœuds capteurs sont idéaux pour des applications telles que la surveillance environnementale, la surveillance de la santé des structures, la gestion des ressources

énergétiques et bien d'autres, car ils peuvent être dispersés sur de vastes zones géographiques et communiquer entre eux sans nécessiter de câblage fixe [45].

3.7 Les protocoles de routage hiérarchiques pour les RCSF à récupération d'énergie

Le moyen le plus simple de résoudre le problème traditionnel de durée de vie des RCSFs était la collecte d'énergie et surtout, l'énergie solaire qui a été adoptée comme une source d'énergie prometteuse pour alimenter les nœuds de capteurs. Il existe quelques expériences qui révèlent que le taux de récolte d'énergie dépend de nombreux facteurs, à savoir, le moment, l'emplacement et aussi la source d'énergie. Cette variété de taux de récolte d'énergie nécessite une certaine forme d'adaptation dans le protocole de routage hiérarchique pour saisir les caractéristiques dynamiques du processus de récolte. Ils incorporent la dynamique de récolte dans la probabilité de litige annoncée par le nœud sink [46].

Dans cette section, nous présentons quelques protocoles de routage hiérarchiques conçus pour les RCSF-RE, où les nœuds de capteurs utilisent l'énergie solaire ou d'autres sources d'énergie ambiante pour recueillir l'énergie nécessaire [47].

3.7.1 Le protocole de clustering de récupération d'énergie (NEHCP)

Le NEHCP (Network Energy Harvesting Clustering Protocol) est basé sur l'algorithme de routage de clustering hiérarchique et ce protocole utilise la RE solaire. La collecte d'informations provenant des nœuds de capteurs est envoyée à la station de base via le chef de cluster. L'algorithme NEHCP est composé de trois sections : la phase initiale, la phase de configuration et la phase de transmission des données. La phase initiale est divisée en trois sections, à savoir la, collecte d'informations, le calcul de la distance et le calcul du rayon. La collecte d'informations est faite sur les nœuds de capteurs, qui sont déployés dans un emplacement différent. Cependant, chaque nœud de capteur diffuse un message à chaque nœud et identifie son emplacement et son principe de fonctionnement pour la méthode proposée. Après le déploiement du nœud et le partage des informations, la station de base (SB) diffuse un message dans le réseau de capteurs pour calculer la distance entre SB et chaque nœud. De plus, il est basé sur la force du signal du réseau et sur une relation indiquée ci-dessous établie entre la distance maximale et minimale de la SB. La sélection du CH est décidée en utilisant l'énergie résiduelle maximale et le taux RE pour le tour en cours. Après avoir élu un CH, les données sont envoyées à la SB en utilisant un routage à un seul saut ou

un routage multi-sauts. Cette méthode donne de meilleures performances en termes de durée de vie du réseau pour les RCSF-RE. [48].

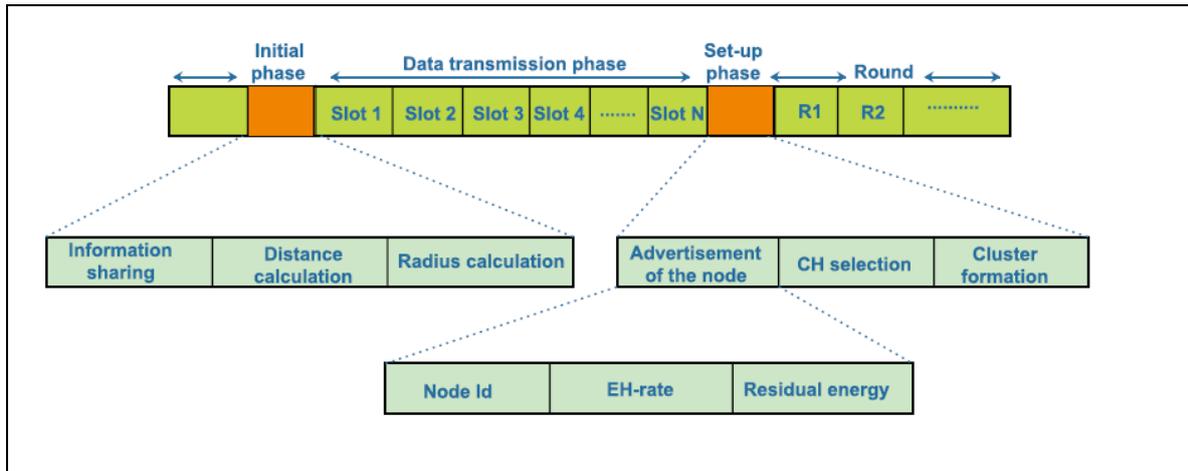


Figure 3.3: Le schéma fonctionnel de l'algorithme NEHCP [48].

3.7.2 CPEH: A Clustering Protocol for the Energy Harvesting wireless sensor networks

CPEH (A Clustering Protocol for the Energy Harvesting) est un nouveau protocole de clustering spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE). Il utilise la logique floue pour former les clusters en tenant compte de plusieurs facteurs comme l'énergie résiduelle des nœuds, leur taux de récupération d'énergie, la densité des nœuds dans la zone et leur distance par rapport au SB. L'optimisation par colonies de fourmis (ACO) est employée pour découvrir les meilleures routes entre les clusters. Une stratégie de relais de cluster head (CHR) permet de remplacer un chef de cluster épuisé par un nœud membre approprié.

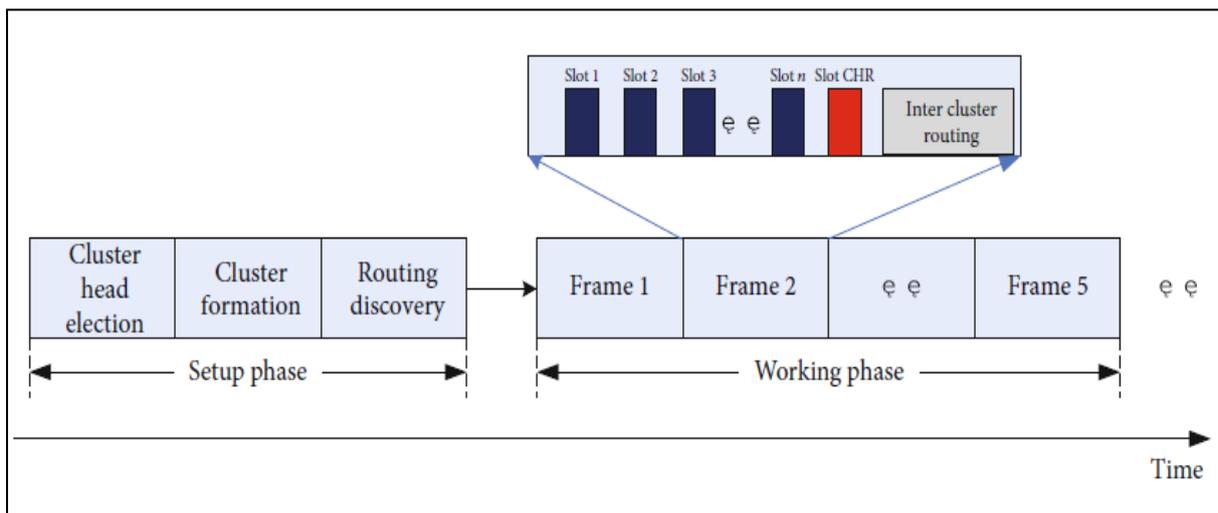


Figure 3.4: Le calendrier de communication de base du CPEH Travail en rounds [49].

Les simulations montrent que CPEH améliore le taux de livraison des données et le débit du réseau comparé à d'autres protocoles. La stratégie CHR contribue à maintenir les clusters opérationnels lorsque les chefs initiaux manquent d'énergie. En résumé, CPEH vise à exploiter les caractéristiques des RCSF-RE grâce à des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue et l'optimisation par colonies de fourmis, afin d'accroître l'efficacité énergétique et les performances réseau, le rendant ainsi bien adapté aux applications de l'industrie. [49].

3.7.3 Le protocole NEEC (Novel Energy Efficient Clustering)

NEEC (Novel Energy Efficient Clustering) est un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE) qui vise à maximiser la durée de vie du réseau et son efficacité énergétique en exploitant l'énergie récupérée de l'environnement. Il combine des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue et les algorithmes génétiques. Son fonctionnement se déroule en deux phases principales : une phase de configuration et une phase de transmission des données. Lors de la phase de configuration, un algorithme génétique forme de manière distribuée les clusters en minimisant la distance entre les nœuds et les chefs de cluster tout en maximisant leur durée de vie énergétique, à l'aide d'une fonction de fitness multi-objectifs basée sur des critères comme la distance, l'énergie résiduelle et la taille des clusters. Les meilleurs chefs de cluster sont alors sélectionnés selon leur valeur de fitness. Pendant la phase de transmission, les nœuds membres envoient leurs données aux chefs selon un ordonnancement TDMA, qui les agrègent avant de les transmettre au puits (SB), avec une mise à jour de l'énergie résiduelle après chaque tour.

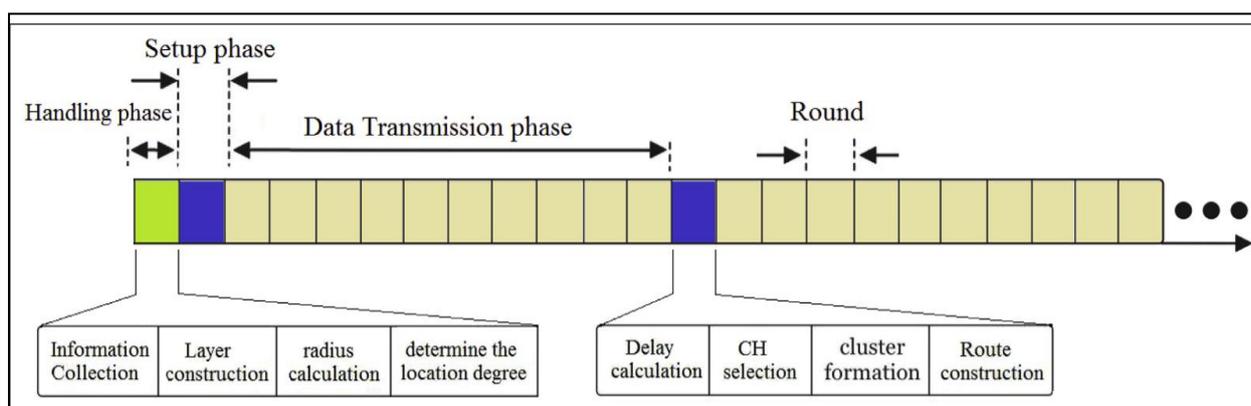


Figure 3.5: Le schéma fonctionnel de l'algorithme NEEC [50].

Les avantages clés de NEEC sont l'exploitation efficace de l'énergie récupérée, l'optimisation distribuée de la formation des clusters par l'algorithme génétique, et

l'ajustement dynamique des paramètres grâce à la logique floue, permettant d'obtenir de meilleures performances en termes de durée de vie et d'efficacité énergétique par rapport aux protocoles existants.

3.7.4 Le protocole EH-SEP (Energy Harvesting Stable Election Protocol)

Conçu pour les réseaux hétérogènes avec récupération d'énergie, il garde la structure de rounds et l'élection probabiliste des CH de LEACH/SEP, Mais modifie les probabilités d'élection selon: l'énergie résiduelle du nœud, l'énergie récupérée par le nœud, et le type de nœud (normal ou avancé), cela augmente les chances des nœuds ayant plus d'énergie disponible, et adopte un routage multi-sauts entre les CH de cluster vers le puits (SB), Contrairement à la transmission directe mono-saut de LEACH/SEP; le prochain saut est choisi selon l'énergie résiduelle et la distance au puits (SB), cela équilibre mieux la consommation d'énergie dans le réseau, donc EH-SEP étend SEP en intégrant la prise en compte de l'énergie résiduelle et récupérée lors de l'élection des Ch., et en adoptant un routage multi-sauts efficace énergétiquement. Cela permet de mieux tirer parti de l'hétérogénéité et de la récupération d'énergie pour augmenter la durée de vie du réseau.[51].

3.7.5 Le protocole HCEH-UC (Hierarchical Cluster-based Energy Harvesting for Uninterrupted Coverage)

Le protocole HCEH-UC (Hierarchical Cluster-based Energy Harvesting for Uninterrupted Coverage) vise à optimiser la consommation d'énergie globale du réseau de capteurs sans fil en exploitant la récupération d'énergie ambiante. Son principe de fonctionnement comprend trois éléments clés :

La formation de clusters adaptatifs : Un algorithme de clustérisations hiérarchique environnementale est utilisé pour former des groupes de nœuds de manière dynamique en fonction de leur déploiement, afin d'optimiser la topologie du réseau et de réduire la consommation d'énergie pour les communications internes aux clusters. Après on a la sélection distribuée des têtes de cluster : Un mécanisme décentralisé permet de choisir les nœuds responsables de chaque cluster (cluster Head ou CH) en tenant compte de leur énergie résiduelle, de leur modèle de consommation d'énergie et des besoins en récupération d'énergie.

L'ajustement distribué des modes d'opération : Le nombre de nœuds en mode récupération d'énergie est contrôlé de manière adaptative et distribuée au sein de chaque

cluster. Les nœuds alternent entre le mode opérationnel (transmission de données) et le mode veille (récupération d'énergie).

L'objectif principal du protocole HCEH-UC est de permettre une couverture ininterrompue de la zone cible en exploitant la récupération d'énergie ambiante. En optimisant dynamiquement les rôles des nœuds en fonction de leur état énergétique et de la topologie du réseau, le protocole vise à assurer une opération perpétuelle du réseau de capteurs. [52].

3.8 Conclusion

La récupération d'énergie est une technologie prometteuse pour les RCSFs, car elle atténue la limitation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue par définir les RCSF à récupération d'énergie et leurs nœuds qui les apportent. Nous décrivons ensuite les différentes architectures du système de récupération d'énergie. À la fin de ce chapitre, nous avons décrit quelques protocoles de routage hiérarchiques proposés pour les RCSF-RE avec leurs principales caractéristiques.

Chapitre 4

«Simulation et Evaluation»

4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous présenterons la description, la simulation et l'évaluation de notre protocole EH-LEACH (Energy harvesting LEACH) en se basant sur le protocole LEACH dans lequel les différents scénarios de simulation sont exposés pour celui-ci, en décrivant d'abord l'environnement de simulation que nous avons utilisé, et enfin, nous discuterons en détail les résultats obtenus à partir de la simulation de ce protocole de routage.

4.2 Définition du problème

La problématique principale des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) réside dans la nécessité de prolonger efficacement leur durée de vie, face aux contraintes énergétiques de leurs nœuds. En effet, les RCSF sont de plus en plus utilisés pour assurer une surveillance continue de l'environnement, grâce au déploiement de nombreux nœuds capteurs. Cependant, ces nœuds ont des ressources énergétiques limitées, généralement alimentés par des batteries. Leur durée de fonctionnement est donc restreinte et peut rapidement s'épuiser s'ils doivent rester opérationnels sur de longues périodes. Ce problème de durée de vie limitée des RCSF constitue un défi majeur, car il compromet leur fiabilité et leur capacité à remplir leurs missions de surveillance à long terme. Il est donc essentiel de trouver des solutions pour prolonger efficacement l'autonomie énergétique de ces RCSF.

4.3 Les objectifs du travail

L'objectif principal de notre travail est d'utiliser les quantités d'énergies récoltées à partir de l'environnement extérieur dans le fonctionnement des nœuds capteur du RCSF tous en intégrant un module de récupération d'énergie dans leur architecture. Cette énergie est exploitée dans le protocole EH-LEACH afin d'améliorer les performances du RCSF et de prolonger leur durée de vie.

4.4 Le protocole proposé

Dans notre travail, et dans le but d'améliorer les performances des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), nous avons modifié le protocole de routage hiérarchique LEACH en y intégrant un mécanisme de récolte d'énergie. Plus spécifiquement, nous avons ajouté une

nouvelle fonction de récupération d'énergie au niveau de l'architecture d'un nœud capteur, permettant à ce dernier de récolter de l'énergie à partir de son environnement externe.

Cette fonction de récolte d'énergie dépend d'une loi de probabilité uniforme, avec une valeur maximale et minimale définies. Ainsi, chaque nœud capteur est en mesure de récolter une certaine quantité d'énergie à partir de cette fonction stochastique. De cette manière, la gestion de l'énergie récupérée devient un élément clé dans notre protocole EH-LEACH, où l'énergie résiduelle de chaque nœud est administrée par un gestionnaire d'énergie intégré à l'architecture du nœud. Ce gestionnaire d'énergie comprend notamment cette nouvelle unité de récupération d'énergie à partir de l'environnement externe, en plus des autres composants classiques. Cette approche vise à optimiser la consommation d'énergie et à améliorer les performances du RCSF.

4.5 Les phases de fonctionnement protocole simulé

Notre protocole se fonctionne selon des rounds (tours ou cycle), où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission.

4.5.1 Phase d'initialisation (Setup phase)

Lors de la phase d'initialisation, chaque nœud décide de manière autonome s'il va devenir chef de cluster (CH) pour le cycle courant. Cette décision est basée sur deux critères :

- **La sélection aléatoire :** Chaque nœud choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1. S'il est inférieur à un certain seuil $T(n)$, alors le nœud se désigne comme CH pour le cycle en cours.
- **Le niveau d'énergie résiduelle :** En plus de la sélection aléatoire, un nœud ne peut devenir CH que si son énergie résiduelle est supérieure ou égale à un certain seuil prédéfini (noté SE).

Cette deuxième condition permet de s'assurer que les nœuds ayant le plus d'énergie disponible sont élus en tant que chefs de cluster.

$$T(n) = \frac{p}{1 - p * \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} \quad \text{Si } (n \in G) \text{ et } S(n).E \geq SE$$

Sinon 0

Avec

- **P** est le pourcentage souhaité de CH c'est-à-dire choisi comme p 0,05 pour une condition optimale.
- **r** est le tour (round).

- G est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CHs lors des $(1/p)$ tours précédents.

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

- $S(n).E$ est l'énergie initiale du nœud de capteur n .
- SE est l'énergie seuil.

Après la sélection des chefs de cluster (CH), vient la partie d'annonce des CHs et la partie d'association aux CHs. Pendant cette étape, les nœuds qui n'ont pas été choisis comme CH vont choisir le CH auquel ils vont s'associer. En général, ils vont s'associer au CH qui leur offre le meilleur lien de communication, c'est-à-dire celui dont le signal reçu est le plus puissant.

4.5.2 La phase de transmission de données (Steady state phase)

Notre protocole EH-LEACH maintient les mêmes étapes utilisées de la phase de transmissions de donnée (Steady state phase) par le protocole LEACH (voir la section 2.3.4.2. du chapitre 2.). Une fois les clusters sont formés et les associations entre les nœuds et leurs chefs de cluster sont établies, la phase de transmission des données peut avoir lieu. Pendant cette phase, chaque nœud transmet ses propres données à son chef de cluster. Ce dernier reçoit des données de tous les nœuds de son cluster, les agrège, puis les retransmet vers la station de base (sink).

Cette phase permet de remonter les données collectées par les différents nœuds du réseau jusqu'à la station de base, tout en limitant le trafic sur le réseau grâce à l'agrégation des données effectuée par les chefs de cluster.

4.6 L'environnement de simulation

4.6.1 Définition du MATLAB

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées. Développé par la société The Math Works, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique et programmation. MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes. Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les retrouver dans un seul endroit. La simulation du protocole étudié requiert l'utilisation et la manipulation de vecteurs, de tableaux et de matrices. Le côté

évaluation des performances quant à lui, requiert la génération de graphes, et donc l'utilisation des outils de traçage qu'offre MATLAB [50].

4.6.2 Les particularités du MATLAB

Comme tout langage de programmation MATLAB permet de définir des données variables. Une variable est désignée par un identificateur qui est formé d'une combinaison de lettres et de chiffres. Le premier caractère de l'identificateur doit nécessairement être une lettre. MATLAB différencie majuscules et minuscules ! Ainsi X33 et x33 désignent deux variables distinctes. Les variables sont définies au fur et à mesure que l'on donne leurs noms (identificateur) et leurs valeurs numériques ou leurs expressions mathématiques. L'utilisation de variables avec MATLAB ne nécessite pas de déclaration de type ou de dimension. Le type et la dimension d'une variable sont déterminés de manière automatique à partir de l'expression mathématique ou de la valeur affectée à la variable. Une variable peut être de type réel, complexe, chaîne de caractères ou logique. Pour MATLAB toute variable est considéré comme étant un tableau d'éléments d'un type donné. MATLAB différencie trois formes particulières de tableaux :

- les scalaires qui sont des tableaux à une ligne et une colonne.
- les vecteurs qui sont des tableaux à une ligne ou à une colonne.
- les matrices qui sont des tableaux ayant plusieurs lignes et colonnes.

Une variable MATLAB est donc toujours un tableau que l'on appelle variable scalaire, vecteur ou matrice suivant la forme du tableau [51]. Dans notre simulation on a utilisé la version R2014a de MATLAB.

4.7 La simulation

La simulation est définie comme « un outil utilisé par le chercheur, l'ingénieur, le militaire, etc. pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel ». Les simulations sont réalisées dans un environnement simulé et non pas réel. Certains simulateurs sont plus complets que d'autres dans les résultats d'une simulation mais tous permettent d'étudier le comportement d'un réseau ayant une topologie et des caractéristiques précises.

Les simulateurs permettent ainsi d'anticiper sur la topologie d'un réseau. Lorsque les résultats d'une simulation ne sont pas satisfaisants, il est facile de modifier la topologie pour corriger les problèmes avancés par la simulation précédente.

La simulation est aussi intéressante pour créer la topologie d'un réseau avant de la mettre en place réellement. Et cela est possible car les simulateurs intègrent un grand nombre d'outils permettant de réaliser des simulations assez réalistes. On peut aussi se servir d'un simulateur pour tester un nouveau protocole (la facilité de l'intégration dépend du simulateur utilisé) avant de l'utiliser réellement (un protocole de réseau de capteurs sans fil) [52].

4.7.1 Les paramètres de simulation utilisés

4.7.1.1 Les paramètres du RCSF à récupération d'énergie

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé un nœud de capteur sans fil reposant sur l'architecture "Récupérer-Recharger-Utiliser" décrite dans la section 3.3.1.2 du chapitre 3. Cette architecture vise à garantir le bon fonctionnement du RCSF jusqu'à la défaillance du matériel. Cette architecture permet d'alimenter les nœuds de capteur de manière autonome, sans dépendre d'une source d'énergie externe. Cela contribue à garantir la longévité et la fiabilité du réseau de capteurs.

– Le type de réseau utilisé et leur topologie

Il y a différents types de réseaux (réseaux mobiles, réseaux fixes), où les nœuds sont déployés de manière différente, tout comme leur topologie. Nous utilisons dans nos simulations un RCSF mobile dont la topologie est dynamique.

Paramètres	Valeurs	Unité de mesure
La surface de déploiement	(100*100)	(m*m)
Localisation de la station de base	(0,0)	Mètre
Nombre des nœuds	(100,50.)	-
Nombre des tours (rounds)	50	-
L'énergie initiale d'un nœud	0.03-0.05	Joule
énergie consommée durant transmission (E_{TX})	$50*0.000000001$	Joule
énergie consommée durant la réception (E_{RX})	$50*0.000000001$	Joule
Energie d'agrégation de données (E_{DA})	$5*0.000000001$	Joule
Probabilité optimale de l'élection des CHs	0.1	-
Seuil d'énergie (SE)	0.01	Joule
La plage de récolte énergétique	{0-0.03}	Joule
Capacité Maximale de la batterie	0.1	Joule

Tableau 4.1: Les paramètres de simulation.

4.7.1.2 Les paramètres de simulation utilisés

Pour évaluer notre protocole EH- LEACH, plusieurs simulations ont été réalisées. Le tableau 4.1 résume les principaux paramètres de simulation utilisés.

Il convient de souligner que nos résultats reposent sur la simulation d'un réseau de 50 à 100 nœuds déployés de manière aléatoire dans une zone de 100 m x 100 m pendant 50 tours de simulation distincts. Dans diverses situations utilisées et mises en place, le trafic est généré périodiquement en ajustant le paramètre de trafic. L'énergie initiale de chaque nœud de capteur est (0,03 joule). Les coordonnées de la station de base (Sink (ou SB)) sont fixés et définies à (0m, 0m) et la probabilité optimale d'élection des Cluster-Heads (CHs) est de 0.1. Ainsi que le protocole EH- LEACH utilise un seuil d'énergie de 0,01 joule, avec une plage de récolte d'énergie allant de 0 à 0.03 joule, et une capacité maximale de batterie de 0,1 joule.

4.7.2 Description de la simulation

4.7.2.1 les métriques de performance

Les métriques de performance utilisées pour évaluer le protocole EH-LEACH sont les suivantes :

1. La durée de vie : La durée utilisée pour l'exécution de simulation du protocole (par tours (rounds)).

Les performances dans cette métrique sont mesurées par cinq points suivants :

1.1 Nœuds vivants durant les rounds (nombre des nœuds vivants dans chaque tour).

1.2 Nœuds morts durant les rounds (nombre des nœuds morts dans chaque tour).

1.3 Nombre du cluster Head (dans chaque tour).

1.4 Paquets envoyés à cluster head (nombre de paquets envoyés à CH dans chaque tour).

1.5 Paquets envoyés à la station de base (nombre de paquets envoyés à SB dans chaque tour).

1.6 La somme de quantité de données reçues par SB et CH

1.7 Energie résiduelle moyenne

4.7.2.2 Bloc de fonctionnement du protocole simulé

Le fonctionnement de base de notre protocole simulé (EH-LEACH) est indiqué par le l'organigramme de la figure suivante :

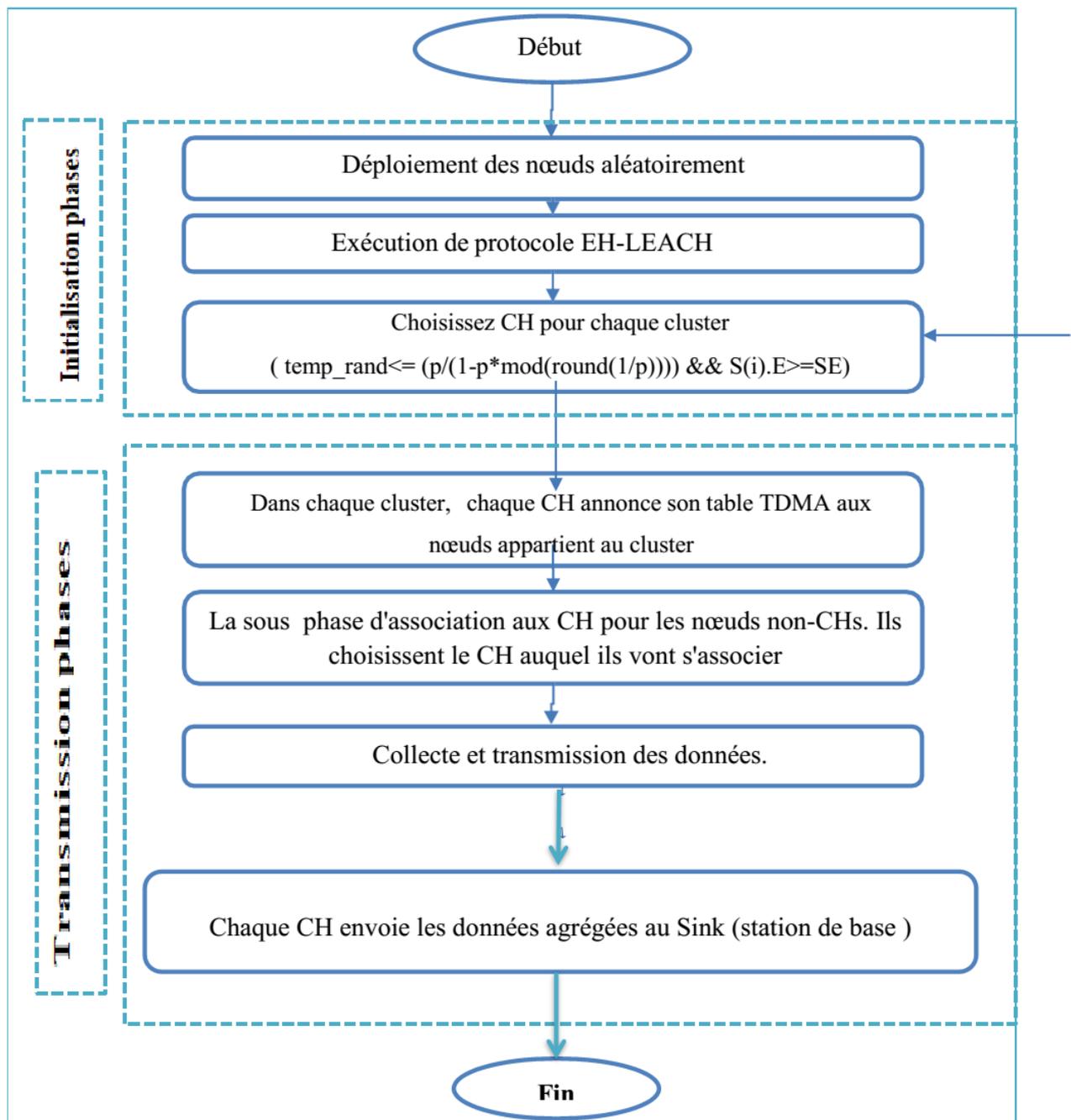


Figure 4.1 : L'organigramme du bloc de fonctionnement du EH-LEACH.

4.7.3 Description Et Evaluation des résultats trouvés

4.7.3.1 L'interface principale

Afin de saisir les différents paramètres de simulation (du RCSF et du protocole EH-LEACH), l'utilisateur doit utiliser l'interface principale de notre simulateur décrit dans la figure suivante:

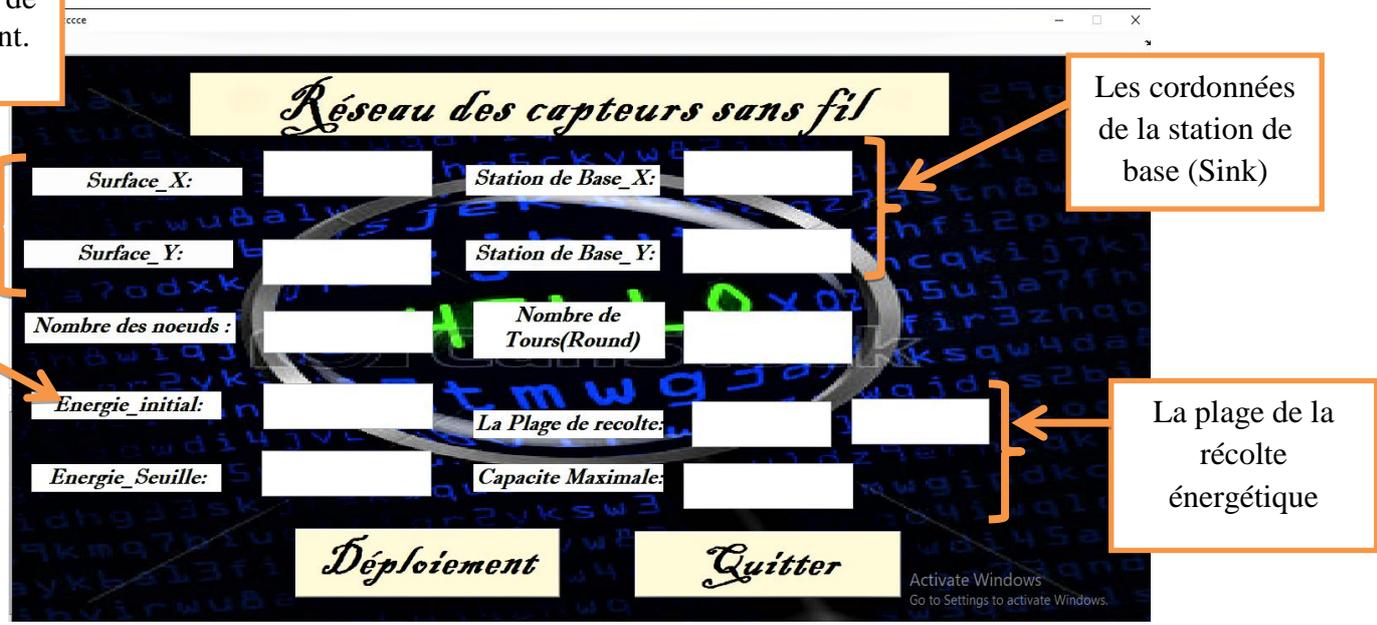


Figure 4.2 : l'interface principale du simulateur.

4.7.3.2 Déploiements des nœuds de capteurs

Cette étape consiste à déployer les nœuds de capteurs sans fil dans un espace à deux dimensions d'une manière aléatoire sur une zone de 100 m² (voir la figure 4.2) on se basant sur une fonction aléatoire qui génère à chaque fois un positionnement différent par rapport au positionnement précédent. Chaque nœud au démarrage possède les données suivantes :

- Une position en deux dimensions.
- Une portée radio de son transmetteur permettant la détection de ses voisins.
- Energie initiale de nœud.
- Energie Seuil

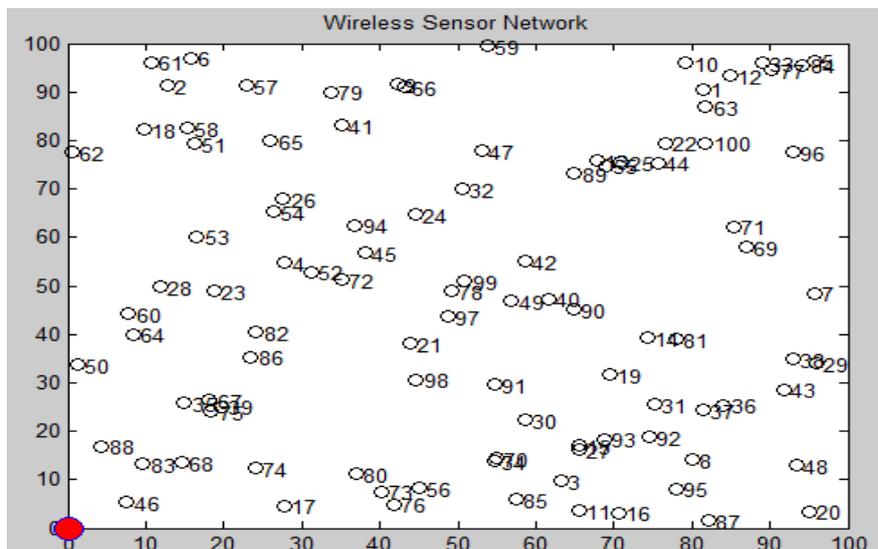


Figure 4.3 : Déploiement aléatoire des nœuds capteurs.

1. Les nœuds morts durant les rounds

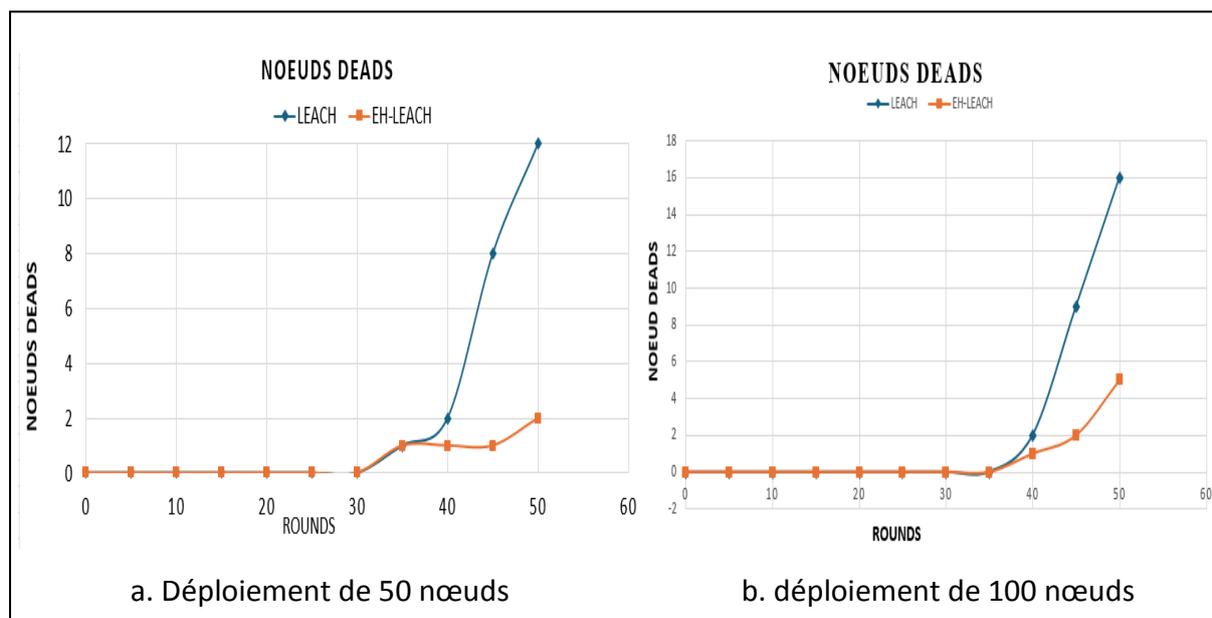


Figure 4.5: Le nombre de nœuds morts.

La figure ci-dessous représente le nombre de nœuds morts dans les deux protocoles EH-LEACH et le protocole LEACH

- Le cas de 50 nœuds

La figure 4.5(a) illustre les résultats du déploiement de 50 nœuds. A partir de cette figure on observe que le protocole EH-LEACH surpasse le protocole LEACH en termes des nœuds morts. Dans le protocole LEACH, le nombre de nœuds morts atteint jusqu'à 12, tandis que dans EH-LEACH, ce nombre est limité seulement à 2 nœuds morts. Ces premiers nœuds morts ont été enregistrés à partir du round 35. La supériorité du protocole EH-LEACH s'explique de l'exploitation des quantités d'énergie récoltées, ce qui réduit le taux de mortalité des nœuds par rapport au protocole LEACH.

- Le cas de 100 nœuds

La figure 4.5 (b) illustre les résultats du déploiement de 100 nœuds. A partir de cette figure on observe qu'aucun nœud n'était mort pendant les rounds 0 à 35 pour les protocoles LEACH et EH-LEACH. Cependant, au round 35, le nombre de nœuds morts dans le protocole LEACH a augmenté avec la diminution de l'énergie initiale, atteignant 16 nœuds morts au round 50. En revanche, dans le protocole EH-LEACH, nous avons constaté une faible augmentation des nœuds morts, atteignant seulement 5 nœuds morts au round 50 grâce à l'exploitation de la récolte énergétique par les nœuds. Cela démontre que le protocole EH-LEACH est plus efficace que LEACH.

2. Les Nœuds vivants durant les rounds

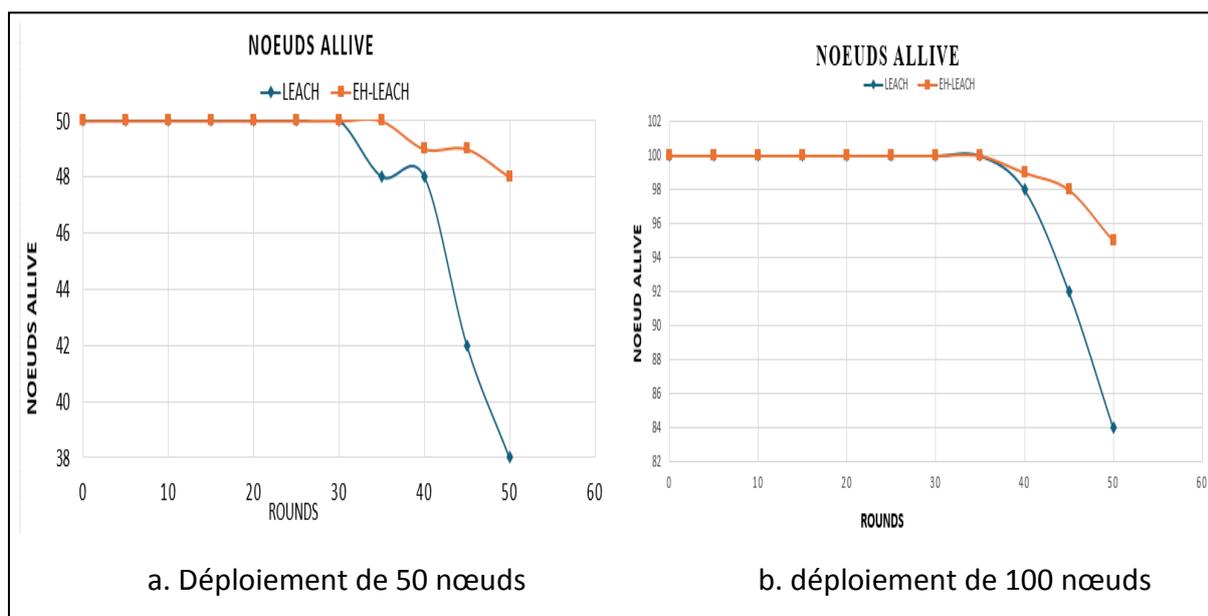


Figure 4.6: Le nombre de nœuds vivants.

La figure ci-dessous représente le nombre de nœuds vivants dans les deux protocoles EH-LEACH et LEACH.

- Le cas de 50 nœuds

La figure 4.6 (a) montre que le protocole EH-LEACH maintient plus de nœuds vivants que le protocole LEACH. Le protocole EH-LEACH à 48 nœuds actifs sur 50, tandis que LEACH a seulement 38 au round 50. Cela montre que le protocole EH-LEACH améliore considérablement le nombre de nœuds vivants restants, grâce à l'utilisation des quantités d'énergie récoltées par les nœuds de capteur dans le réseau.

- Le cas de 100 nœuds

La figure 4.6 (b) montre le nombre de nœuds vivants avec une énergie initiale de 0,03 joule de chaque nœud pour les protocoles LEACH et EH-LEACH. On remarque qu'entre les rounds 0 et 35, le nombre de nœuds vivants reste constant à 100. Cependant, entre les rounds 35 et 50, le nombre de nœuds vivants dans LEACH diminue à 84, tandis que dans EH-LEACH, il ne diminue qu'à 95. Cette supériorité du protocole EH-LEACH s'explique par l'utilisation des quantités d'énergie récoltées dans le réseau, permettant aux nœuds de rester actifs plus longtemps en améliorant leur efficacité énergétique.

3. Le nombre de Cluster Head

La figure 4.7 représente le nombre de CHs (Clusters Heads) dans les deux protocoles. D'après cette figure, on remarque que la courbe n'est pas stable, ce qui signifie que le nombre de CHs change à chaque tour. Le nombre de clusters Head fluctue entre 4 et 8 ($4 \leq k \leq 8$).

Dans le protocole EH-LEACH, nous observons une légère amélioration du nombre de clusters Head par rapport au protocole LEACH, mais la tendance reste similaire.

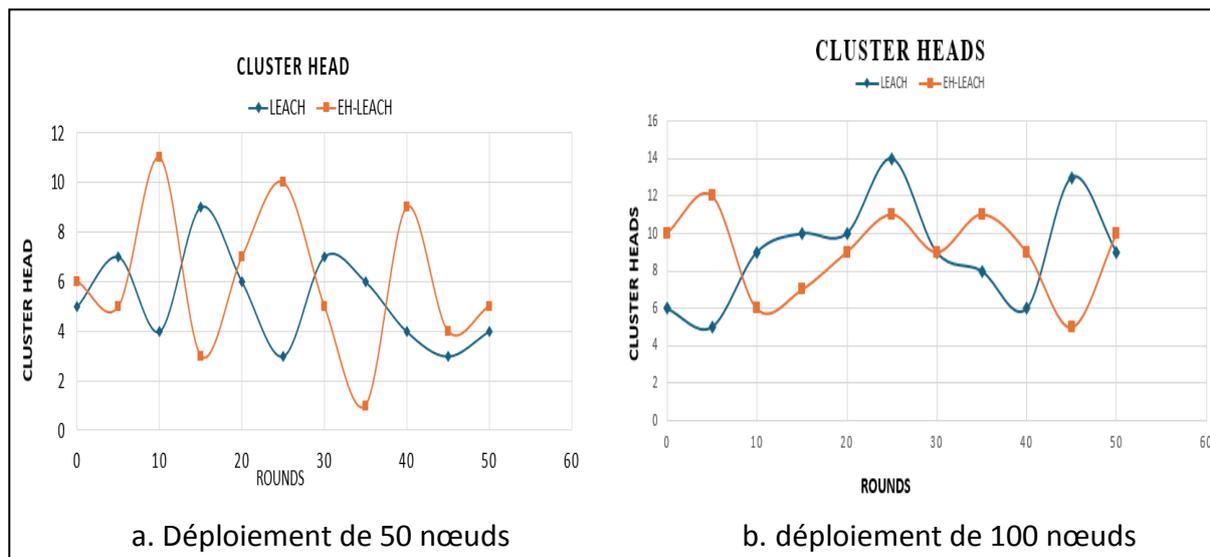


Figure 4.7: Le nombre de Cluster Head par tour.

4. Les paquets envoyés à Cluster Head

La figure 4.8 présente les résultats de la métrique de la quantité de données reçues par le cluster-Head (CH), exprimée en fonction du nombre de paquets envoyés par les nœuds vers le cluster-Head. Les résultats montrent que les deux protocoles maintiennent la transmission de données jusqu'au round 50, dans le protocole LEACH le nombre de paquets envoyés est environ 4400 messages. En revanche, le protocole EH-LEACH génère environ 4500 paquets sur la même période. Ce résultat s'explique par le fait que chaque nœud capteur peut transmettre ses paquets dans sa propre fenêtre de temps allouée par le cluster-Head, laquelle n'est pas identique pour tous les nœuds du même cluster.

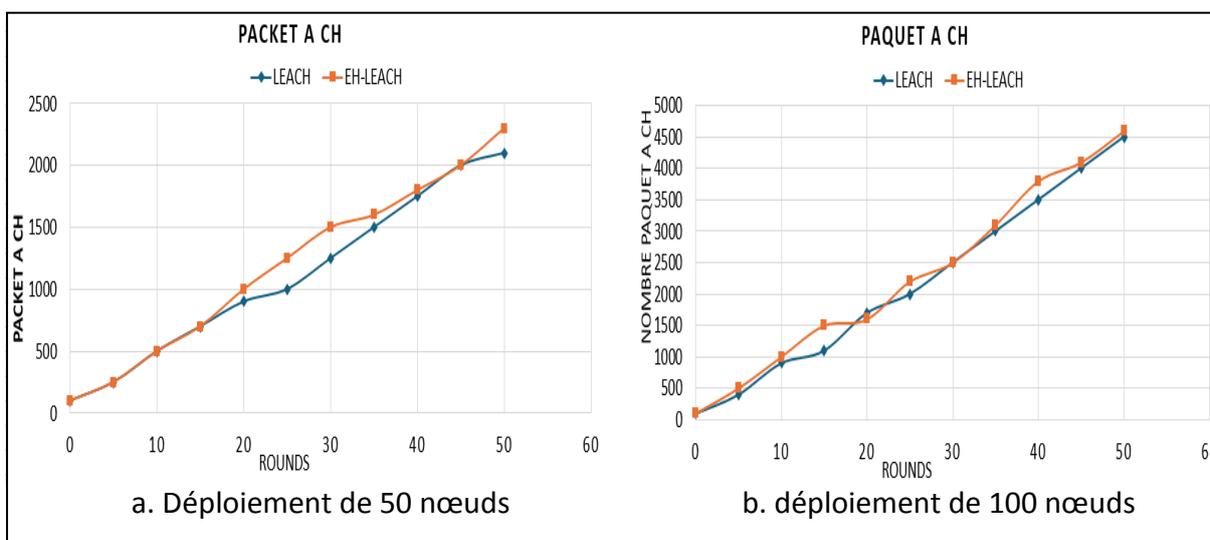


Figure 4.8: Paquets envoyés à CH

5. Les paquets envoyés à SB :

La figure 4.9 présente les résultats de la métrique de la quantité de données reçues par la station de base (SB), exprimée en fonction du nombre de paquets envoyés par les cluster-Heads vers la station de base. Les résultats montrent que le protocole LEACH assure une transmission de données de paquets important, d'environ 5607 messages. De même, le protocole EH-LEACH assure une transmission de données jusqu'au round 50 avec un nombre de paquets important, d'environ 56000 messages. Ce résultat s'explique par le fait que les paquets de données sont transmis vers la station de base uniquement par les cluster-Heads. De plus on observe que le protocole EH-LEACH se distingue en facilitant l'agrégation des données, ce qui se traduit par une augmentation simple de la quantité de données reçues dans le réseau. Cette amélioration s'explique par la capacité du protocole EH-LEACH à regrouper efficacement les données avant de les transmettre, réduisant ainsi la redondance et améliorant l'efficacité globale de la communication.

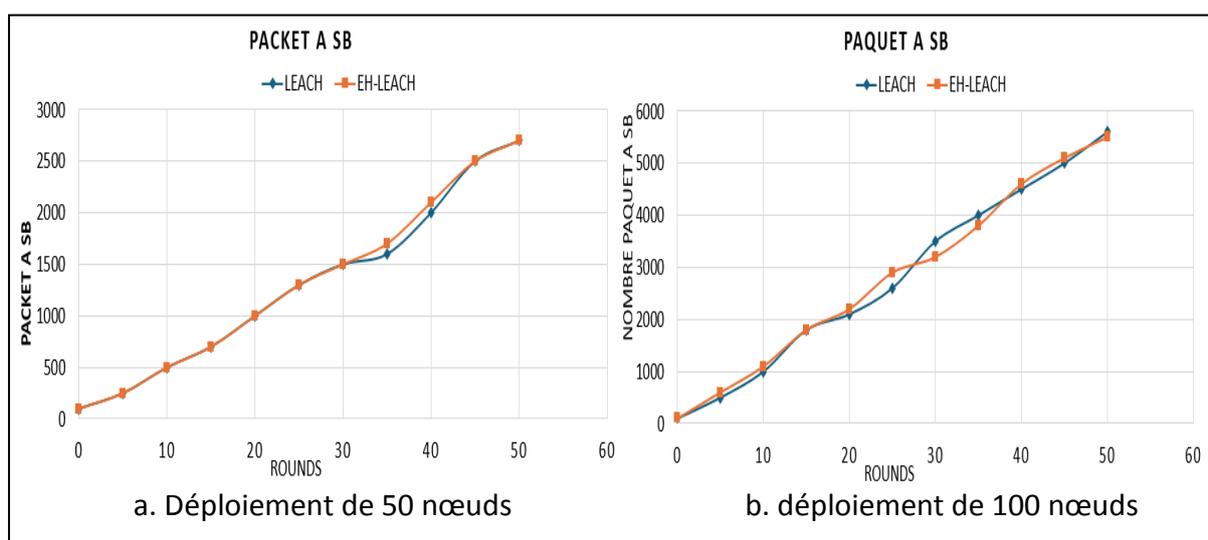


Figure 4.9: Paquets envoyés à SB.

6. Débit (La somme de quantité de données reçues par SB et CH)

La figure 4.10 présente le résultat en termes de la somme totale des données reçues par la station de base et les cluster-Heads jusqu'au round 50. Pour le protocole LEACH, cette somme atteint un nombre important de paquets, environ 10 007 messages. En comparaison, le protocole EH-LEACH génère un nombre important de paquets, atteignant environ 10 100 messages, soit une légère amélioration par rapport à LEACH. Cette amélioration modeste du protocole EH-LEACH par rapport à LEACH s'explique par sa capacité à optimiser l'agrégation des données, permettant une transmission plus efficace et une légère augmentation de la quantité totale de données reçues dans le réseau.

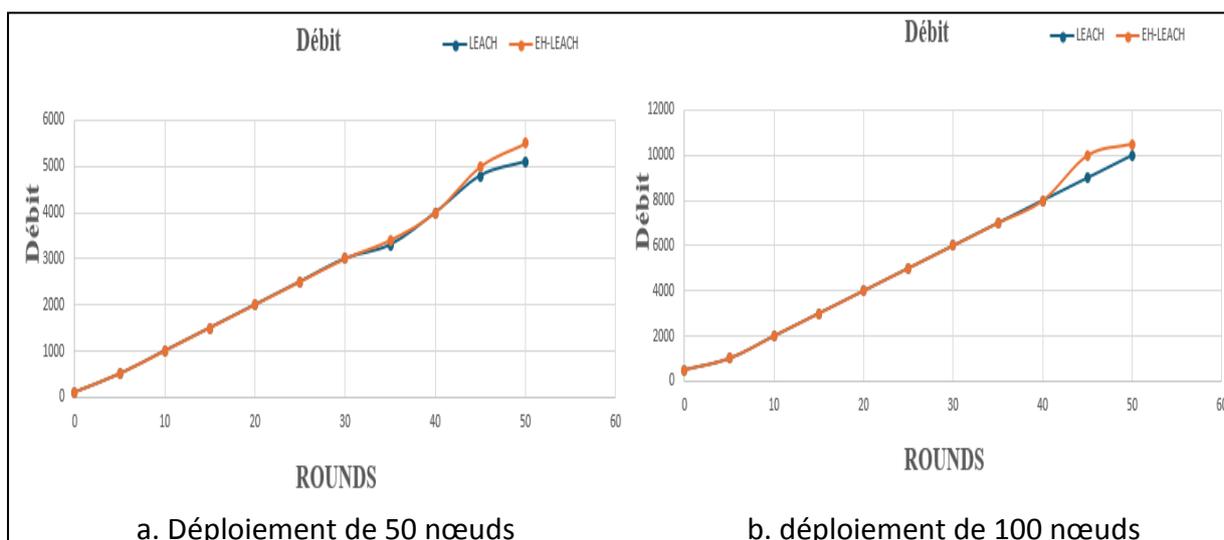


Figure 4.10 : La somme de quantité de données reçues par SB et CH.

7. Energie résiduelle moyenne

La figure 4.11 représente les résultats de la métrique de l'énergie résiduelle en fonction du nombre de rounds pour les deux protocoles, LEACH et EH-LEACH. On constate une diminution progressive de l'énergie avec le protocole LEACH. En outre, les résultats démontrent que le protocole EH-LEACH affiche une meilleure performance énergétique que le protocole LEACH. Cette amélioration s'explique par l'utilisation des quantités d'énergie récoltées par les nœuds dans le réseau.

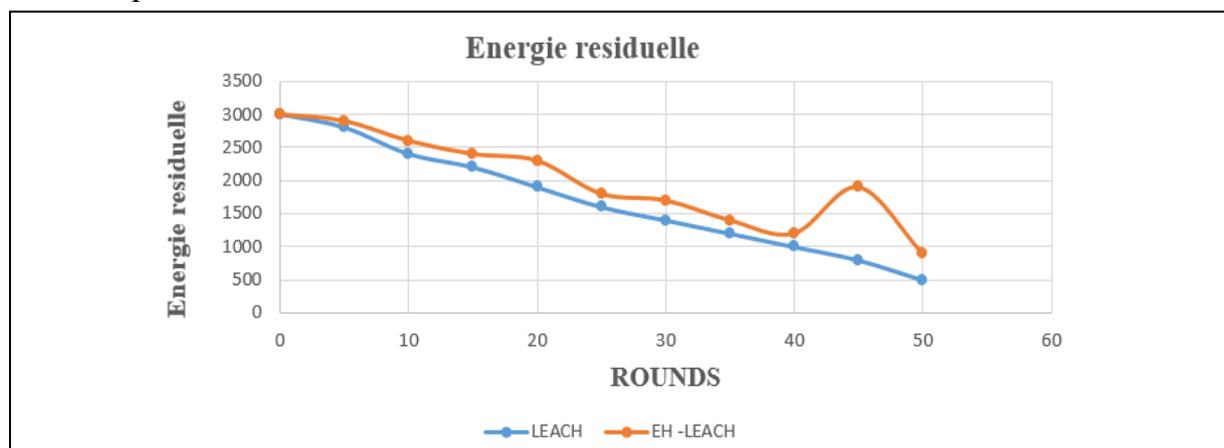


Figure 4.11: Energie résiduelle moyenne.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique, l'objectif et le fonctionnement de notre protocole de routage EH-LEACH. Nous avons également simulé notre protocole sous MATLAB et présenté les résultats obtenus. Les résultats de simulation montrent que le protocole EH-LEACH est capable d'améliorer l'efficacité énergétique et les performances du RCSF telles que : le taux de survie des nœuds et le débit. Cela est dû à l'utilisation de récolte énergétique par les nœuds dans le RCSF et dans la fonctionnalité du protocole EH-LEACH.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les percées technologiques actuelles dans le domaine de la microélectronique permettent le développement de nouvelles architectures matérielles, telles que les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ces derniers constituent un sujet de recherche très actif et peuvent être utilisés dans de nombreuses applications. Cependant, il reste encore des défis à relever afin de pouvoir les utiliser dans des conditions réelles. L'un de ces défis est la problématique de l'optimisation de la consommation énergétique et de l'amélioration de la durée de vie des RCSF. Ce problème est causé par le fait que ces réseaux peuvent être déployés dans des environnements inaccessibles et que leurs batteries à faible puissance ne peuvent pas être rechargées ou remplacées. De ce fait, l'utilisation de systèmes de récupération d'énergie ambiante est donc essentielle pour améliorer l'autonomie des RCSF. Dans ce travail, les nœuds de capteurs sont équipés d'un système de récupération d'énergie qui leur permet de convertir les sources d'énergie environnementales, comme l'énergie solaire, en énergie électrique stockée pour leur fonctionnement.

L'étude débute par une introduction générale présentant la problématique et les objectifs. Le chapitre 1 décrit les RCSF, les différentes couches protocolaires d'un nœud de capteur et leurs sources de consommation énergétique, ainsi que des notions clés telles que la couverture, la connectivité et la durée de vie. Le chapitre 2 présente la description du protocole de routage hiérarchique LEACH. Le chapitre 3 décrit quelques protocoles de routage hiérarchiques pour les RCSF à récupération d'énergie (RCSF-RE). Le chapitre 4 détaille le protocole simulé, les simulations effectuées et l'évaluation des résultats trouvés.

Dans ce travail, nous avons simulé le fonctionnement de notre protocole EH-LEACH proposé sous Matlab et le comparons avec le protocole LEACH durant les différents rounds, où nous avons intégré un nouveau module de récupération d'énergie au niveau de l'architecture de chaque nœud de capteur du RCSF. Grâce aux différentes simulations effectuées, nous avons observé que notre protocole EH-LEACH surpasse LEACH en termes de : nœuds morts, nœuds vivants, nombre de Cluster Head, paquets envoyés au cluster head, paquets envoyés au SB, débit et l'énergie résiduelle

moyenne. De ce dernier point, on peut dire que notre protocole EH-LEACH prolonge la durée de vie du RCSF et a une plus grande efficacité énergétique par rapport au protocole LEACH.

Comme une perspective, et pour connaître les améliorations du protocole de routage EH-LEACH, nous envisageons par la suite les perspectives suivantes :

- Comparaison du protocole EH-LEACH proposé avec d'autres protocoles de routage hiérarchiques basés sur la récolte énergétique.
- L'évitement toutes sorte d'envoi à de longues distances (d'un CHs vers la station de base) en intégrant une technique de routage multi-sauts (d'un CH vers ses voisins jusqu'à la station de base).
- La simulation du protocole EH-LEACH proposé sous un simulateur dédié aux RCSF comme NS2, OMNET++,...etc.

Bibliographie

- [1]. H. Nabila et M. Salima <Simulation du Routage dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils mémoire master en Informatique> Université A/Mira de Bejaïa , Année : 2016- 2017. Disponible sur: <<http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/6301/1/Evaluation-du-Protocole-Directed%20.pdf>> (Consulté le 12/02/2024).
- [2]. Mohammed, Hichem MEKIDICHE et RAIS <La géolocalisation de réseaux capteurs (algorithme DVHOP)>, Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Université Abou BakarBelkaid à Tlemcen Algérie 2011- 2012.
- [3]. Davis, A., & Chang, H. « A survey of Wireless Sensor Networks Architectures ». International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES) 3(6), December. (2012).
- [4]. Malick GAYE, Etat de l'art sur les WSN (Wireless Sensor Network), Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Juin 2014.
- [5]. <https://www.techno-science.net/definition/11711.html> consulté le 4 mars 2024.
- [6]. https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-capteurs-sans-fil-page2.html#ref_5.
- [7]. TinyOS. <http://www.tinyos.net/>, 2010+
- [8]. A. Dunkels , B. Grönvall, et T. Voigt<Contiki: a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors> In Proceedings of the First IEEE Works on Embedded Networked Sensors, pages 455-462, Tampa, Florida, USA, 2004.
- [9]. Messaoud Belloula, La géolocalisation dans les réseaux de capteurs sans fil Etude de cas: Utilisation en agriculture, Thèse de Magistère, Université Hadj Lakhder-Batna, 2012.
- [10]. Mandicou BA, Vers une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc: cas des réseaux de capteurs sans, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 21 Mai 2014.
- [11]. ABDELLAOUI, M. M., & ; KACHOURI, E. M. A. Contributions à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.
- [12]. Yacine Challal <réseau de capteur sans fil >, support de cours, 17/11/2008.
- [13]. David Martins, Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil Stéganographie et réseaux de confiance, Thèse de doctorat, Université de Franche -Comté, 2010.
- [14]. Z. Bouzidi and A.Benameur, "mise en place d'un réseau de capteur sans fil pour l'irrigation intelligente", Master's thesis, M'mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Juillet, 2012.
- [15]. Cour Networking Académie Cisco.
- [16]. Yasser Romdhane <Évaluations des performances des protocoles S-MAC et directed diffusion dans les réseaux des capteurs > rapport de projet de fin d'étude, école supérieure des communications de Tunis, 2007.
- [17]. C. Schurgers, O. Aberthorne, and M. B. Srivastava, Modulation scaling for energy aware communication systems. In Low Power Electronics and Design, International Symposium. pp. 96–99. On, 2001.
- [18]. I.F. Akyildiz. Wireless sensor networks. In Lecture Notes, IFA'07, GeorgiaInstitute of Technology, 2007.

- [19]. O. Dousse, P. Mannersalo, P. Thiran, Latency of wireless sensor networks with uncoordinated power saving mechanisms, in: Proc. 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '04), Tokyo, Japan, May 24–26, 2004.
- [20]. R. Kacimi, R. Dhaou, A.L. Beylot, A. Delye Mazieux, V. Gauthier, M.Marot, J. Vaudour, and M. Becker, Les réseaux de capteurs sans fil. In Livrable Projet CAPTEURS, SP1, V1.2, IRIT-ENSEEIH et INT, Rapport de recherche INT, 2006.
- [21]. Chen, Y., & Zhao, Q. « On the Lifetime of Wireless Sensor Networks ». IEEE Communication Letters, 9(11), 976-978, November. (2005).
- [22]. Zhang, H.H., & Hou, J.C. « Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks ». Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 1(1), 89-124, March. (2005).
- [23]. BENGHENI, A. (2019). Utilisation de la Récolte Énergétique pour l'Amélioration de la Durée de Vie des Réseaux de Capteurs Sans Fil (Doctoral dissertation, 19-06-2022).
- [24]. Kamel BEYDOUN < Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs >, Thèse de Doctorat, , Doctorat, U.F.R des Sciences Techniques de l'université de Franche-Comté, Décembre 2009.
- [25]. Abdelkader TOUDJI et Abdallah DLIMI <Une approche hybride pour conception d'un protocole de routage multi-saut dans les réseaux de capteur sans fil >, Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Université Ahmed Draia - Adrar, 2016-2017.
- [26]. Mohammed Hadadj et Malek KHENFER <Étude comparative entre les protocoles de Routage RCSF> Mémoire MASTER PROFESSIONAL en informatique UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2016-2017.
- [27]. KHIATI Mustapha <Impact de la technique duty-cycle sur la diffusion globale dans les réseaux de capteurs sans fil RCSF > THESE DE MAGISTER Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB) Faculté d'électronique et d'informatique, département d'informatique.
- [28]. Scarpa, S. Buso, and G. Spiazzi. 2009. Low-complexity MPPT technique exploiting the PV module MPP locus characterization. IEEE Trans. Industr. Electron. 56, 5 (May 2009), 1531–1538. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2009618>.
- [29]. R. Fatima Zohra "Evaluation de LEACH dans un environnement fortement bruité Réseaux et Systèmes Distribués (R.S.D) " Mémoire de Master, Département d'Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, Juin 2015.
- [30]. K. Akkaya, et M. Younis, <A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks>Journal of Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, May 2005, pp. 325-349.
- [31]. Cours LEACH Disponible sur :<https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_78.html> (Consulté le 23/04/2024).
- [32]. Bilami Azeddine <protocole de routage pour les réseaux de capture sans fil> MEMOIRE DE MAGISTERE EN INFORMATIQUE Université de l'Hadj Lakhdar-Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département d'informatique. Promotion2007-2008.

- [33]. M. GHEBBI Sofiane <Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil >MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE, Université A/Mira de Béjaia Faculté des Sciences Exactes, 2016.
- [34]. Internet of things limitations of LEACH Disponible sur :protocol l<<https://books.google.dz/books?id=VAG7BQAAQBAJ&pg=PA106&lpg=PA106&dq=internet+of+things+limitations+of+LEACH+protocol&source=bl&ots=o8kydz5vzX&sig=ACfU3U16I0YhRbcbJRxDUGp10P2FIDniw&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj3y5TSrKDqAhVSCxoKHQpkBgMQ6AEWA3oECAoQAQ#v=onepage&q=internet%20of%20things%20limitations%20of%20LEACH%20protocol&f=false>> Consulter le (26/04/2024).
- [35]. More, A., and Raisinghani. A node failure and battery-aware coverage protocol for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 64, 200–219., 2017.
- [36]. W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks, *Inproc of the Hawaii International Conference on System Science*, vol. 8, pp. 8020, January 2000.
- [37]. S. Sudevalayam and P. Kulkarni. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. In *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 13, no.3, pp. 443-461, Third Quarter 2011.
- [38]. Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B. Srivastava. STEM: Topology management for energy efficient sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, volume 3, pages 7889, Big Sky, Montana, USA, 2002.
- [39]. Li and D. Liu. 2015. DPSO-based clustering routing algorithm for energy-harvesting wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP'15)*. IEEE, 1–5, 2015.
- [40]. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic. *Mobile Ad Hoc Networking: The Cutting Edge Directions*. Vol. 35. John Wiley & Sons, New Jersey, 2013
- [41]. Zhou, L. Huang, W. Li, and Z. Zhu.. Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: 20 pages , A Survey. *J. Sensors* 2014, Article 815467, Seah et al. 2014.
- [42]. Zou, J. Peng, K. Liu, F. Jiang, and H. Lu. Energy-efficient cooperative spectrum sensing for cognitive sensor networks with energy harvesting. In *Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference (CCDC'16)*. IEEE, 2373–2378. 2016.
- [43]. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, and S. Gupta. 2010b. Optimal energy management policies for energy-harvesting sensor nodes. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 9, 4 (April 2010), 1326–1336. DOI :<http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2010.04.080749>.
- [44]. Carmona, B. Alorda, and M. A. Ribot. 2014. Energy consumption savings in ZigBee based WSN adjusting power transmission at application layer. In *Proceedings of the 2014 24th International Workshop on Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation (PATMOS'14)*. IEEE, Palma de Mallorca, Spain, 1–6. DOI :<http://dx.doi.org/10.1109/PATMOS.2014.6951884>.
- [45]. Li, H., & Ye, D. (2018). *Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WENs): A Review and Look Forward*. *IEEE Access*, 12990-13003.
- [46]. Djouher N. Agrégation de données à la volée pour un réseau de capteur sans fil (RCSF). -sociale.ummo.dz, 2012.

-
- [47]. Cheick Tidjane KONE. Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande. p33_34 le 18 octobre 2011.
- [48]. Han, Y., Su, J., Wen, G., He, Y., & Li, J. (2021). CPEH: a clustering protocol for the energy harvesting wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1-14.
- [49]. Han, Y., Su, J., Wen, G., He, Y., & Li, J. (2021). CPEH: a clustering protocol for the energy harvesting wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1-14.
- [50]. Bozorgi, S. M., Rostami, A. S., Hosseinabadi, A. A. R., & Balas, V. E. (2017). A new clustering protocol for energy harvesting-wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 64, 233-247
- [51]. Aslam, B., Rizwan, M., & Fahad, M. Energy Harvesting using LEACH and SEP Protocols in Heterogeneous Wireless Sensor Networks.
- [52]. Han, B., Ran, F., Li, J., Yan, L., Shen, H., & Li, A. (2022). A novel adaptive cluster based routing protocol for energy-harvesting wireless sensor networks. *Sensors*, 22(4), 1564.
- [53]. M. GHEBBI Sofiane <Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil >MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE, Université A/Mira de Béjaia Faculté des Sciences Exactes, 2016.
- [54]. Cours MATLAB Disponible sur : <<https://perso.univrennes1.fr/stephane.balac/matlab/matlab.pdf>> Consulter le (29/5/2024).
- [55]. A. Naima et R. Kheira <Simulation de la surveillance des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sous Omnet++> Mémoire Pour l'obtention du diplôme de MASTER UNIVERSITE IBN KHALDOUN – TIARET , 2019.