



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 : Réseaux et télécommunications

Par :

KHARROUBI ZOHRA

AOUCI HIBA

Sur le thème

**La simulation d'un protocole de clustering efficace pour les
réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie**

Soutenu publiquement le 16 / 06 /2025 à Tiaret devant le jury composé de :

Mr BOUALEM Adda	MCA	Université Ibn Khaldoun	Président
Mr BENGHENI Abdelmalek	MCA	Université Ibn Khaldoun	Encadrant
Mme ZENATI Anissa	MAB	Université Ibn Khaldoun	Examineur

2024-2025

Remerciements

*En premier lieu, nous rendons grâce "**Allah**" des bienfaits qu'il nous a accordés 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 **BOUALEM Adda** et Mme **ZENATI Anissa** 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 de l'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.

DÉDICACES

TOUT D'ABORD, JE VOUDRAIS REMERCIER LE DIEU BON ET
UNIQUE QUI M'A DONNÉ

LE COURAGE ET LA VOLONTÉ NÉCESSAIRES POUR FAIRE FACE À
DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES.

DE LA VIE. JE DÉDIE CET OUVRAGE À MES CHERS PARENTS POUR
LEURS SACRIFICES ET

LEURS ENCOURAGEMENTS TOUT AU LONG DE MES ÉTUDES.

JE DÉDIE CE TRAVAIL À

À TOUS MES FRÈRES

MES SŒURS ET LEURS ENFANTS

À MON FRÈRE QUI M'A AIDÉ, HOUARI

À TOUS MES COLLÈGUES DE TRAVAIL

ZOHRÀ

DÉDICACES

TOUT D'ABORD, JE VOUDRAIS REMERCIER LE SEUL BON DIEU QUI M'À
DONNÉ.

LE COURAGE ET LA VOLONTÉ NÉCESSAIRES POUR AFFRONTER
DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES.

À MES CHERS PARENTS QUI M'ONT SOUTENU ET ENCOURAGÉ JUSQU'À
CE QUE JE PUISSE RÉUSSIR

À MA SŒUR BOCHRA, À MES FRÈRES MOHAMMED ET KHALIL, À MA
GRAND-MÈRE ET À MES TANTES POUR AVOIR ÉTÉ À MES CÔTÉS.

HIBA

La liste des abréviations.....	I
La liste des figures	II
Résumé.....	III
Introduction générale :.....	1
Chapitre I: Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)	
I.1 Introduction :.....	4
I.2 Architecture :.....	4
I.2.1 Architecture du nœud de capteur :.....	4
I.2.2 Architecture du RCSF :.....	6
I.3 Applications du RCSF :	6
I.4 Objectifs et défis de conception du RCSF :.....	8
I.5 Pile protocolaire dans les RCSF :	10
I.6 Consommation d'énergie dans les RCSF :.....	12
I.7 Durée de vie d'un RCSF :	12
I.8 Récupération d'énergie dans les RCSF :.....	13
I.8.1 Définition de la récupération d'énergie (RE) :	13
I.8.2 Sources d'énergie pour la récupération énergétique :	13
I.8.3 Techniques de la récupération énergétique :	14
I.9 Architecture du nœud de capteur à récupération d'énergie :.....	15
I.10 Architecture d'un RCSF à récupération d'énergie (RCSF-RE) :	15
I.11 Conclusion :	16
Chapitre II: Le protocole de Routage Hiérarchique LEACH	
II.1 Introduction :	18
II.2 Définition de routage :.....	18
II.3 Différents types de routages :	18
II.3.1 Routage à plat :.....	19
II.3.2 Routage basé sur la localisation :	19
II.3.3 Routage hiérarchique :.....	19
II.4 Protocole de routage LEACH: Low Adaptive Clustering Hierarchy:.....	19
II.4.1 Présentation du protocole LEACH :.....	19
II.4.2 But du protocole LEACH :.....	19

II.4.3 Principe de fonctionnement du protocole LEACH :	20
II.4.3.1 Phase de configuration (setup phase) :	20
II.4.3.2 Phase de communication (steady state phase):	21
II.4.4 Avantages du protocole LEACH :	22
II.4.5 Inconvénients du protocole LEACH :	23
II.5 Extensions du protocole LEACH :	23
II.5.1 LEACH-C (LEACH Centralized):	23
II.5.2 V-LEACH (Vice LEACH):	24
II.5.3 YA-LEACH (Yet Another LEACH):	24
II.5.4 TB-LEACH (Time-based Cluster selection LEACH):	25
II.6 Conclusion :	26
Chapitre III : Le protocole de routage IEH-EACH	
III.1 Introduction :	28
III.2 Limitation du protocole LEACH :	28
III.3 Protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF-RE :	29
III.3.1 Le protocole CPEH: A Clustering Protocol for the Energy Harvest-ing wireless sensor networks :	29
III.3.2 Le protocole NEEC: Novel Energy Efficient Clustering :	30
III.3.3 Le protocole NEHCP: Network Energy Harvesting Clustering Protocol :	31
III.3.4 Le protocole HCEH-UC : Hierarchical Cluster-based Energy Har-vesting for Uninterrupted Coverage) :	32
III.4 Protocole de routage IEH-LEACH : Improved Energy Harvesting-LEACH	33
III.4.1 Présentation du protocole IEH-LEACH :	33
III.4.2 But du protocole IEH-LEACH :	33
III.4.3 Principe de fonctionnement du protocole IEH-LEACH.....	34
III.4.3.1 Phase de configuration (set-up phase)	34
III.4.3.2 Phase de communication (steady state phase)	35
III.4.4 Interférences entre clusters.....	36
III.5 Conclusion :	36
Chapitre IV : Evaluation des Résultats de Simulation	
IV.1 Introduction :	38
IV.2 Objectif du travail :	38
IV.3 Environnement de simulation :	38

IV.3.1 Présentation du MATLAB :.....	38
IV.3.2 Les caractéristiques de MATLAB :.....	38
IV.4 La simulation :.....	39
IV.5 Paramètres de simulation et métrique de performance :.....	39
IV.5.1 Paramètres du RCSF-RE :	39
IV.5.2 Les métriques de performance :.....	41
IV.6 Description du simulateur :.....	41
IV.6.1 Interface principale :	41
IV.6.2 Déploiements des nœuds de capteurs :	42
IV.6.3 Découverte des nœuds voisins :.....	42
IV.6.4 L'exécution du protocole IEH-LEACH :	43
IV.7 Évaluation des performances et comparaison :.....	44
IV.8 Conclusion :	48
Conclusion générale :	50
Bibliographie	52

La liste des abréviations

BS : Base Station.

CDMA : Code Division Multiple Access.

CH : Cluster Head.

CPEH : Clustering Protocol for the Energy Harvesting.

IEH : Improved Energy Harvesting.

IEH-LEACH : Improved Energy Harvesting-LEACH.

IEH-WSN : Improved Energy Harvesting Wireless Sensor Networks.

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

MAC : Medium Access Control.

MATLAB : Matrix Laboratory.

NEHCP : Network Energy Harvesting Clustering Protocol.

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fils.

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

TDMA : Time Division Multiple Access.

WSN : Wireless Sensor Networks.

La liste des figures

Figure 1. 1 : Architecture d'un nœud de capteur.....	4
Figure 1. 2 : Architecture d'un RCSF.....	6
Figure 1. 3 : Applications des RCSF	6
Figure 1. 4 : Exemple d'un RCSF dans le domaine militaire.....	7
Figure 1. 5 : La pile protocolaire dans les RCSF	10
Figure 1. 6 : Architecture d'un nœud capteur à récupération d'énergie	15
Figure 2. 1 : Les types de routage	18
Figure 2. 2 : Fonctionnement du protocole LEACH	20
Figure 2. 3 : Phase de configuration du cluster (set-up phase)	21
Figure 2. 4 : Temps distribué pendant la phase de transmission.....	22
Figure 2. 5 : Le schéma fonctionnel du protocole LEACH-C	23
Figure 2. 6 : Le schéma fonctionnel du protocole V-LEACH.....	24
Figure 3. 1 : Le calendrier de communication de base du CPEH fonctionne par rounds ..	30
Figure 3. 2 : Le diagramme fonctionnel du protocole NEEC.....	31
Figure 3. 3 : Le diagramme fonctionnel du protocole NEHCP	31
Figure 4. 1 : L'interface principale du simulateur.....	41
Figure 4. 2 : Déploiements des nœuds de capteur.....	42
Figure 4. 3 : Découverte des nœuds voisins.....	43
Figure 4. 4 : Nombre de nœuds vivants	44
Figure 4. 5 : Nombre de nœuds morts	45
Figure 4. 6 : Nombre de Cluster Heads par round.	46
Figure 4. 7 : Energie résiduelle moyenne	47
Figure 4. 8 : Nombre de paquets reçus par la SB.....	47

ملخص:

تعتمد شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks -WSN) على جمع البيانات من بيئة معينة من خلال عقد استشعار موزعة، وترسلها إلى محطة القاعدة لمعالجتها. ومن أبرز التحديات التي تواجه هذه الشبكات هو محدودية الطاقة، مما يستدعي البحث عن حلول فعالة لإدارة الطاقة. ومن بين الحلول المقترحة، تبرز شبكات الاستشعار المعتمدة على الحصاد الطاقة (- improved Energy Harvesting (IEH)، والتي تُعرف بـ IEH-WSN، كخيار واعد لزيادة عمر الشبكة وتحسين أدائها. تعتمد هذه الشبكات على استغلال مصادر الطاقة المحيطة مثل الطاقة الشمسية أو الاهتزازات لتغذية العقد. في هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى اقتراح بروتوكول IEH-LEACH والذي يساعد على تحسين عمل بروتوكول التوجيه LEACH بالاستعانة الى كميات الطاقة المتحصل عليها من الطاقة الخارجية (مثل: الطاقة الشمسية) من خلال ادراج وحدة حصاد الطاقة في كل عقدة داخل الشبكة. يساعد هذه الأخير على تحسين الية اختيار رؤساء العناقيد، بحيث يتم الاعتماد على العقد ذات الطاقة المتبقية القصوى بدلا من الاختيار العشوائي المستخدم في بعض البروتوكولات التقليدية مثل LEACH تم تنفيذ البروتوكول المقترح IEH-LEACH داخل بيئة Matlab حيث تم تحليل الأداء ومقارنته مع بروتوكول LEACH .

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

Abstract :

Wireless sensor networks (WSNs) collect data from a specific environment via distributed sensor nodes and send them to a base station for processing. One of the main challenges these networks face is energy limitation, which requires the search for efficient energy management solutions. Among the proposed solutions, energy harvesting sensor networks (EH-WSNs) stand out as a promising option to extend the network lifetime and improve its performance. These networks rely on the exploitation of ambient energy sources, such as solar energy or vibrations, to power the sensor nodes in the network. Therefore, this work aims to propose the IEH-LEACH (Improved Energy Harvesting-LEACH) protocol, which allows improving the performance of the LEACH routing protocol by exploiting the energy obtained from external sources (e.g., solar energy) through the integration of an energy harvesting module at each node of the network. This module improves the cluster head selection mechanism, relying on the nodes with maximum residual energy instead of the random selection used in some traditional protocols like LEACH. The proposed IEH-LEACH protocol was implemented in the MATLAB environment where its performance was analyzed and compared with that of the LEACH protocol.

Keywords: Energy Harvesting (EH), Wireless Sensor Networks for Energy Harvesting (EH-WSN), Matlab simulation environment.

Résumé :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) collectent des données d'un environnement spécifique via des nœuds de capteurs distribués et les envoient à une station de base pour traitement. L'un des principaux défis auxquels ces réseaux sont confrontés est la limitation de l'énergie, ce qui nécessite la recherche de solutions efficaces de gestion de l'énergie. Parmi les solutions proposées, les réseaux de capteurs à récupération d'énergie (RCSF-RE) se distinguent comme une option prometteuse pour prolonger la durée de vie du réseau et améliorer ses performances. Ces réseaux s'appuient sur l'exploitation de sources d'énergie ambiantes, telles que l'énergie solaire ou les vibrations, pour alimenter les nœuds de capteur dans le réseau. De ce fait, ce travail vise à proposer le protocole IEH-LEACH (improved Energy Harvesting-LEACH), qui permet d'améliorer les performances du protocole de routage LEACH en exploitant l'énergie obtenue à partir de sources externes (par exemple, l'énergie solaire) grâce à l'intégration d'un module de récupération d'énergie à chaque nœud du réseau. Ce module améliore le mécanisme de sélection des têtes de cluster, en s'appuyant sur les nœuds disposant d'énergie résiduelle maximale au lieu de la sélection aléatoire utilisée dans certains protocoles traditionnels comme LEACH. Le protocole IEH-LEACH proposé a été implémenté dans l'environnement MATLAB où ses performances ont été analysées et comparées à celles du protocole Matlab.

Mots-clés : Récupération d'énergie (RE), réseaux de capteurs sans fil pour la récupération d'énergie (RCSF-RE), logiciel de simulation Matlab.

Introduction Générale

Introduction générale :

Au cours des dernières années, le sans-fil a notablement changé notre quotidien depuis son arrivée sur le marché. Elle a introduit plusieurs nouvelles fonctionnalités, ainsi qu'une meilleure connectivité entre les individus, les objets et les données. Le développement du paradigme sans fil a entraîné l'apparition de diverses architectures dérivées, comme les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil et les réseaux Ad hoc. En ce moment, l'accent est mis sur les réseaux de capteurs sans fil.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou "Wireless Sensor Network (WSN)" désignent des réseaux composés de petits dispositifs électroniques autonomes dotés de capteurs, aptes à s'auto-organiser pour observer une zone précise. Ces capteurs travaillent ensemble et transmettent les informations de point en point jusqu'à atteindre la station de base. Ils ont généré un intérêt international, ce qui a conduit à leur adoption dans divers domaines pour favoriser la vie humaine, tels que les réseaux intelligents, les systèmes de contrôle et de surveillance, les services de santé, les logements intelligents, les infrastructures de transport avancées, etc. Pour ces usages, les RCSFs permettent d'effectuer plusieurs fonctions comme la surveillance en temps réel de l'environnement, la collecte de données à distance, la coopération entre les capteurs et l'optimisation de la consommation d'énergie. Ils favorisent aussi une évaluation continue des données pour des décisions efficaces, une gestion optimisée des systèmes automatiques, une surveillance à distance des systèmes essentiels et une diminution des dépenses. Pour réaliser ces missions efficacement, les RCSFs doivent être solides, résilients aux pannes et autonomes en énergie.

Avec l'intégration de la récupération d'énergie (RE), de nouveaux types de nœuds de capteurs ont été créés, capables de récolter de l'énergie à partir de l'environnement externe (solaire, vibratoire, thermique, etc.), appelés nœuds de capteurs de récupération d'énergie. Cela a modifié la principale norme de la conception des protocoles de clustering pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE).

Dans ce mémoire, nous visons à examiner quelques protocoles de clustering proposés dans la littérature pour les RCSF-RE, puis à simuler et évaluer notre protocole IEH-LEACH proposé et fondé sur la récupération d'énergie en utilisant le simulateur MATLAB, où nous avons étendu l'architecture du nœud de capteur en intégrant un module de récupération d'énergie dans son architecture.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre aborde les réseaux de capteurs sans fil, avec une présentation des couches et des niveaux de gestion de la pile protocolaire, ainsi que de leurs structures de communication et de leurs domaines d'application. La technologie de récupération d'énergie sera ensuite expliquée en définissant ses différents concepts fondamentaux.
- Dans le deuxième chapitre, le protocole de routage hiérarchique LEACH est décrit.
- Le chapitre trois présente certains protocoles de routage récemment proposés pour RCSF-RE, y compris des définitions telles que : les limitations du protocole LEACH et la description de notre protocole de routage proposé IEH-LEACH (Improved Energy Harvesting-LEACH).
- Le quatrième chapitre décrit notre simulation du protocole IEH-LEAH que nous avons proposé suivi par leur évaluation en se basant sur le même principe de communication utilisée par le protocole LEACH. Afin de simuler ce protocole, le besoin d'implémenter un nouveau module de récupération d'énergie dans l'environnement de simulation Matlab, s'est fait sentir pour plus d'objectivité.
- Enfin, une conclusion générale faisant part de la synthèse des principaux résultats de simulation obtenus au cours de ce travail, et quelques perspectives.

Chapitre I

« Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) »

I.1 Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont omniprésents, leur utilisation étant étendue à divers secteurs en raison de la diversité de leurs applications. Un réseau de capteurs sans fil est constitué d'un groupe de nœuds de capteurs qui échangent des informations entre eux par le biais d'une connexion sans fil. Ces nœuds de capteurs surveillent, détectent et transmettent des données relatives à des phénomènes significatifs dans une zone donnée vers un point de collecte éloigné, appelé station de base. Les nœuds de capteurs qui forment un RCSF sont des appareils délicats, équipés d'une batterie à énergie limitée qui est souvent non rechargeable.

De plus, les spécificités de ces nœuds, ainsi que les conditions difficiles dans lesquelles ils sont utilisés, les rendent susceptibles de subir des pannes, souvent dues à un manque d'énergie ou à des événements naturels. Ces échecs peuvent entraîner un dysfonctionnement complet du système. Dans ce chapitre, nous exposons les caractéristiques et les limitations inhérentes aux RCSF.

I.2 Architecture :

I.2.1 Architecture du nœud de capteur :

Un nœud capteur est constitué de quatre composants essentiels : un dispositif d'acquisition ou de capture, un module de traitement, une unité de transmission et un système de gestion de l'énergie. En fonction de l'application prévue, il peut aussi comporter des modules supplémentaires, tels qu'un système de géolocalisation par satellite GPS (Global Positioning System) ou un système de production d'énergie, par exemple une cellule solaire. Certains capteurs, légèrement plus volumineux, peuvent même intégrer un module de mobilité, leur offrant la possibilité de se déplacer en fonction des besoins [1].

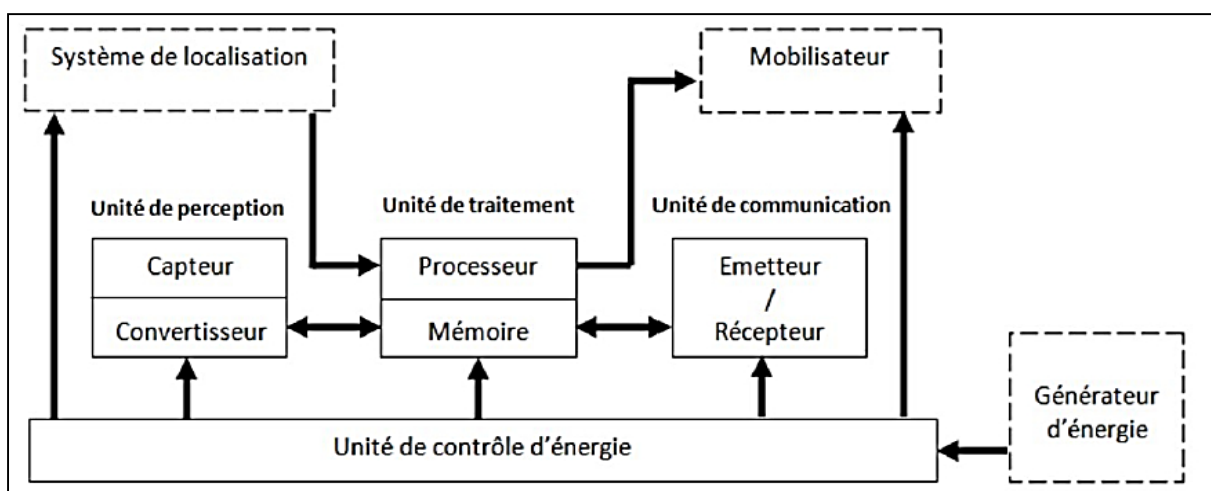


Figure 1.1 : Architecture d'un nœud de capteur.

On peut observer sur la Figure 1.1 les différents éléments qui composent un capteur. Plus précisément, chaque groupe de composants a sa propre fonction.

I.2.1.1 L'unité de capture :

Elle est composée de deux sous-unités : un capteur qui a pour rôle de mesurer les paramètres de l'environnement et un convertisseur analogique-numérique, chargé de transformer les données collectées sous forme de signal analogique en signal numérique avant de les transmettre à l'unité de traitement [2].

I.2.1.2 L'unité de traitement :

Elle comprend deux interfaces : l'une est réservée à l'unité d'acquisition et l'autre à l'unité de transmission. Cette unité abrite un processeur, souvent associé à une petite capacité de stockage, et opère sous un système d'exploitation spécifiquement élaboré pour les micro-capteurs, tel que TinyOS. Sa fonction principale est de collecter les données transmises par l'unité d'acquisition et de les diriger vers l'unité de transmission. En outre, l'unité de traitement gère les protocoles de communication facilitant l'interaction entre les nœuds du réseau. Elle a également la capacité d'analyser les informations capturées pour alléger la charge de traitement du nœud puits [3].

I.2.1.3 L'unité de transmission :

L'unité de transmission supervise l'envoi et la réception des informations à travers un canal de communication radio. Elle peut être classée comme optique ou radiofréquence. Les communications optiques présentent une excellente résistance aux interférences électromagnétiques, mais exigent une ligne de vue continue entre les entités communicantes, ce qui limite les transmissions à travers les obstacles. D'autre part, les communications en radiofréquence, telles que celles employées avec les appareils MICA, nécessitent une consommation énergétique supérieure [4].

I.2.1.4 L'unité de contrôle d'énergie :

Les trois unités précédentes opèrent à l'aide d'une source d'énergie, souvent une batterie. Du fait de sa dimension réduite, cette source est limitée et généralement non interchangeable, ce qui a un impact direct sur la durabilité du réseau. La fonction de l'unité d'alimentation consiste à distribuer l'énergie disponible entre les divers modules et à optimiser la consommation en mettant en mode veille les composants qui ne sont pas utilisés, par exemple.

Elle peut aussi intégrer des systèmes de récupération d'énergie issus de l'environnement, comme des cellules solaires, dans le but d'étendre la longévité générale du réseau [2].

I.2.2 Architecture du RCSF :

Un réseau de capteurs sans fil, aussi appelé réseau de capteurs sans fil (RCSF), se compose de centaines, voire de milliers, de capteurs. Ces dispositifs, connus sous le nom de motes en anglais, fonctionnent avec une batterie et sont généralement placés de façon aléatoire ou semi-aléatoire dans une zone déterminée, également appelée zone de captage ou zone d'intérêt. Ils réalisent des mesures à des intervalles définis et transmettent les informations recueillies via une liaison sans fil à un point central plus performant, appelé nœud puits ou station de base. Il est chargé de gérer les données, en réalisant des calculs statistiques tels que le maximum, la moyenne ou la médiane des valeurs collectées [5].

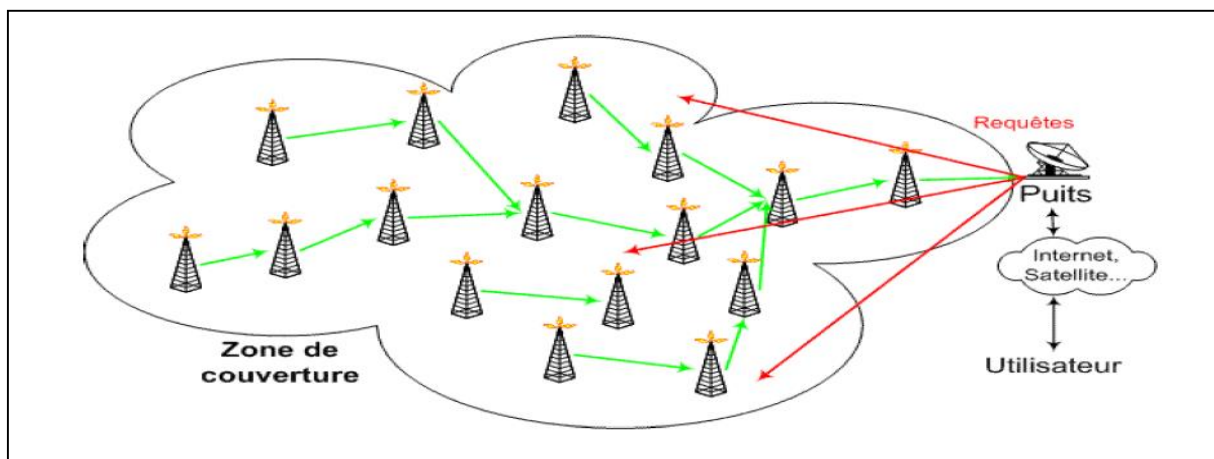


Figure 1.2 : Architecture d'un RCSF

I.3 Applications du RCSF :

Les champs d'application du RCSF peuvent en général être divisés en deux catégories : l'observation et le contrôle.

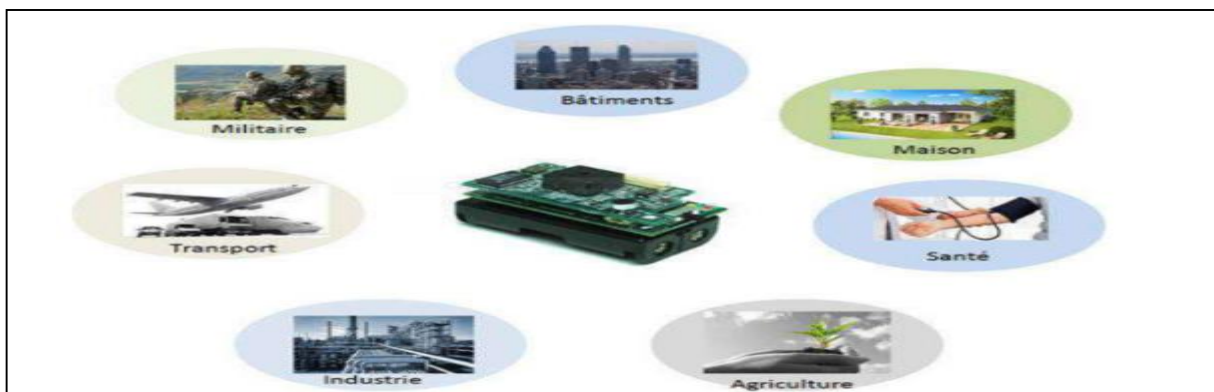


Figure 1.3 : Applications des RCSF

Les applications de surveillance incluent la surveillance à l'intérieur et à l'extérieur, comme celle de la santé humaine, tandis que les applications de suivi comprennent l'une des plus cruciales en géologie : la prévision des catastrophes, telles que les séismes, les tsunamis, etc. La Figure 1.3 montre les différentes applications potentielles des RCSF.

I.3.1 Applications militaires :

Comme pour de nombreuses technologies, le secteur militaire a été essentiel dans l'évolution des réseaux de capteurs. Leur croissance rapide, leur coût réduit, leur faculté d'organisation autonome et leur solidité face aux pannes les rendent particulièrement adaptés à ce domaine. Ces réseaux, installés dans des régions clés ou difficiles d'accès, facilitent la surveillance en temps réel de tous les mouvements, qu'ils soient amicaux ou hostiles [6].

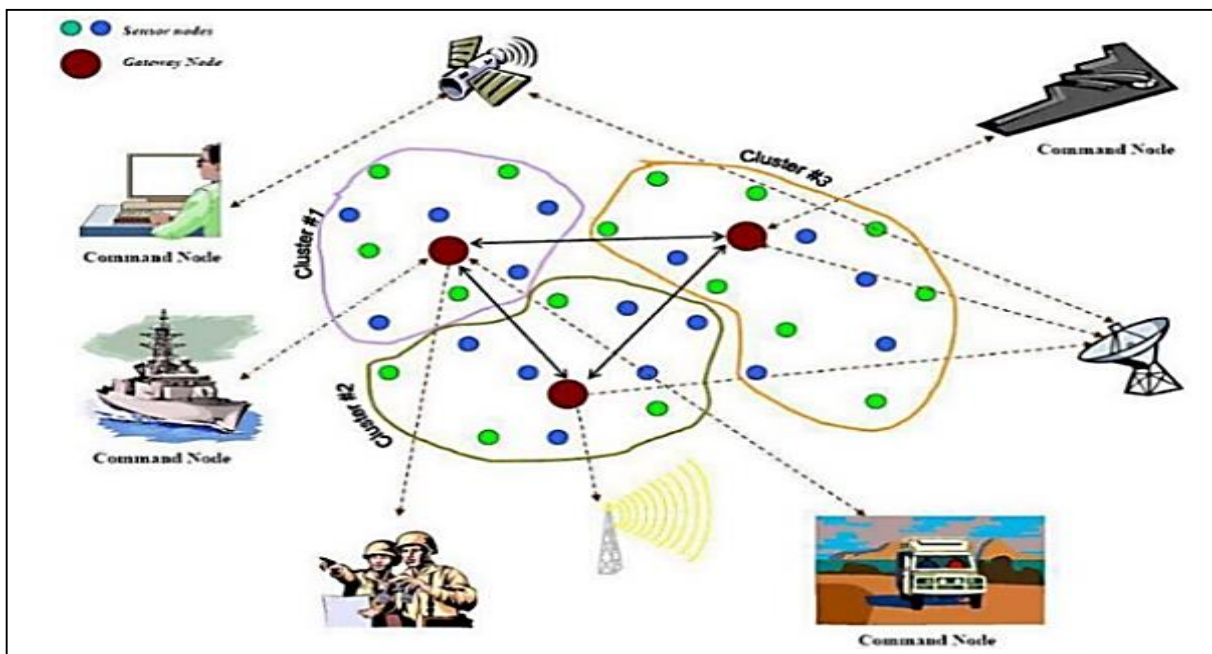


Figure 1.4 : Exemple d'un RCSF dans le domaine militaire

I.3.2 Applications environnementales :

Le RCSF peut être utilisé pour observer divers indicateurs dans une zone particulière. Ces capteurs offrent des informations précises concernant la température et la pression, tout en étant également capables de détecter des fuites de gaz, des incendies et d'évaluer le degré de pollution. Le projet ARGO représente un exemple significatif d'application écologique, exploitant plusieurs capteurs pour évaluer la température, la salinité et la vitesse des courants océaniques, avec une durée de vie des nœuds estimée à environ 45 ans. Le laboratoire de

recherche Intel, en association avec Archive et Agri-Food Canada, a réalisé une nouvelle étude pour surveiller les régions arides dans le secteur agricole [7].

I.3.3 Applications médicales :

La surveillance des fonctions essentielles de l'être humain serait des micro-capteurs pouvant être ingérés ou implantés sous la peau. Elles ont la capacité, sans faire appel à la chirurgie, de communiquer des images provenant de l'intérieur d'un réseau de capteurs en médecine pourraient offrir une surveillance suivie constante des patients et une capacité à recueillir des données physiologiques de meilleure qualité, ce qui simplifie le diagnostic de certaines maladies [8].

I.3.4 Applications commerciales :

Les réseaux de capteurs présentent un grand potentiel dans divers secteurs tels que la logistique et l'architecture. Ils offrent un suivi instantané des biens, augmentant la qualité du service et diminuant les dépenses. Dans une perspective d'économie circulaire, les capteurs favorisent également le recyclage et la réutilisation des articles. Dans le bâtiment, ils améliorent l'efficacité énergétique en ajustant automatiquement les systèmes aux exigences réelles. Une mise en œuvre à grande échelle pourrait diminuer considérablement la demande énergétique mondiale ainsi que les émissions de gaz à effet de serre, offrant une opportunité significative pour les entreprises de relier performance et responsabilité écologique [9].

I.4 Objectifs et défis de conception du RCSF :

La conception des RCSFs doit tenir compte de divers éléments afin d'assurer leur bon fonctionnement. Parmi ces éléments, voici les principaux à considérer :

Les objectifs d'un RCSF

Les objectifs de base des RCSFs dépendent généralement des applications, cependant les tâches suivantes sont communes à plusieurs applications :

- Établir les valeurs de certains paramètres en fonction d'une situation spécifique. Par exemple, dans un réseau écologique, on peut vouloir mesurer la température, la pression de l'air, l'intensité lumineuse et l'humidité relative à divers endroits.
- Identifier la survenance des événements qui nous intéressent et évaluer les paramètres des événements identifiés. Par exemple, dans les systèmes de gestion du trafic, on peut souhaiter repérer le déplacement des véhicules à travers un carrefour et évaluer la vitesse ainsi que l'orientation du véhicule.

- Catégoriser l'objet identifié. Par exemple, dans un réseau de circulation, un véhicule peut être une voiture ou un bus.

La conception du RCSF est influencée par plusieurs facteurs, des technologies permanentes et manipulées de manière appropriée :

- Contrainte énergétique : Dans un réseau de capteurs, l'énergie est perçue comme la principale limitation lors de la transmission et de la réception des données entre les nœuds. L'énergie doit être correctement exploitée afin que les batteries ne se déchargent pas trop vite. Les batteries ne sont pas toujours facilement remplaçables dans des situations comme la surveillance d'une zone difficile d'accès.
- La résistance aux pannes : La tolérance aux fautes est la capacité de conserver les fonctions du réseau sans interruptions causées par une défaillance sur un ou plusieurs capteurs. Certains nœuds peuvent produire des erreurs ou cesser de fonctionner en raison d'un manque d'énergie, d'un souci physique ou d'une interférence. Ainsi, ces pannes peuvent provoquer un mauvais fonctionnement du réseau et l'empêcher d'accomplir sa mission dans des conditions optimales.
- Contraintes environnementales : Les capteurs interagissent avec l'environnement dans lequel ils mesurent les grandeurs physiques. Les capteurs doivent être conçus pour supporter diverses conditions environnementales difficiles (chaleur intense, pluie, humidité).
- Limites de mise à l'échelle : La mise à l'échelle (scalabilité) signifie que le réseau est assez vaste et peut s'étendre de façon illimitée. Une des particularités des RCSF est qu'ils peuvent intégrer des centaines ou des milliers de capteurs. C'est en effet la fonction principale des réseaux de capteurs, qui doivent être capables de s'auto-organiser à grande échelle et de rester efficaces, peu importe le nombre.

Pour cela, les protocoles des réseaux de capteurs sans fil doivent être en mesure de fonctionner et de s'adapter en fonction du nombre de nœuds.

- Contraintes concernant la qualité de service : La qualité se caractérise par la faculté d'analyser les données recueillies par le puits.
- La sécurité : La protection physique et la sécurité des échanges sont parmi les exigences fondamentales, notamment dans les domaines sensibles comme les

applications militaires ou médicales. Ils peuvent être exposés à des risques de sécurité, comme le piratage, la falsification et le vol de données, qui peuvent mettre en danger la sécurité et la confidentialité des informations recueillies par le réseau.

I.5 Pile protocolaire dans les RCSF :

Pour améliorer la robustesse du réseau, l'architecture en couches est choisie pour une mise en œuvre efficace du RCSF.

La pile protocolaire des RCSF est constituée de cinq niveaux que les nœuds doivent utiliser, à savoir : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique, accompagnés de trois plans de gestion : le gestionnaire d'énergie, le gestionnaire de mobilité et le gestionnaire des tâches [10].

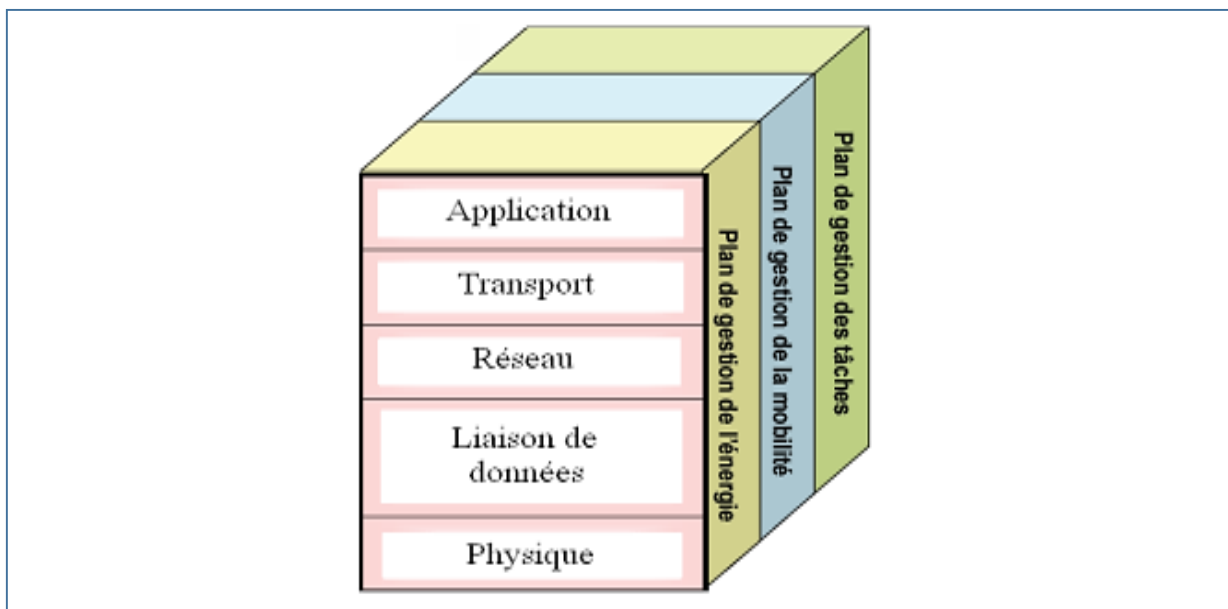


Figure 1.5 : La pile protocolaire dans les RCSF

I.5.1 La couche physique :

Cette couche est essentielle pour créer le lien entre la pile de protocoles et le matériel de communication du réseau. Elle supervise le transport des bits constitutifs d'une trame de la couche de liaison de données via le support réseau. Elle obtient un cadre complet de la couche liaison de données, le convertit en une série de signaux et l'envoie au support local. Les bits encodés constituant la trame sont ensuite reçus par un dispositif final ou intermédiaire [11].

I.5.2 La couche liaison de données :

Cette couche vise principalement à multiplexage les flux de données, à identifier et à sécuriser les trames, à gérer l'accès au média (MAC : Media Access Control) et à réaliser le

contrôle des erreurs. Elle garantit une liaison fiable, que ce soit une liaison point à point ou multipoint, en fonction de la configuration du réseau de capteurs. Parmi les protocoles de liaison de données, on peut notamment mentionner SMACS (Contrôle d'accès au médium auto-organisé pour les réseaux de capteurs) et EAR (Ecouter et Enregistrer) [12].

I.5.3 La couche réseau :

Cette couche gère le routage des données provenant de la couche de transport. Elle crée les routes entre les nœuds de capteurs et le nœud de collecte, en choisissant le parcours le plus optimal selon des critères comme la consommation d'énergie, le délai de transmission et le débit. Les protocoles de routage des RCSF se différencient de ceux employés dans les réseaux Ad Hoc, surtout à cause de diverses caractéristiques [10] :

- L'absence d'un adressage fixe pour les nœuds, qui sont remplacé par un adressage fondé sur leurs caractéristiques.
- La création de communications à plusieurs sauts.
- La consolidation de données analogues en connectant plusieurs sources à une seule destination.

I.5.4 La couche transport :

Cette couche est responsable de la transmission des données en les segmentant en paquets, tout en assurant le contrôle du flux, le maintien de l'ordre des paquets et la gestion des erreurs de transmission.

Elle repose sur deux protocoles essentiels :

- TCP (Protocole de contrôle de transmission), qui garantit une transmission fiable et séquentielle.
- UDP (User Datagram Protocol), qui privilégie la vitesse au détriment de la confiance.

I.5.5 La couche application :

La couche applicative constitue le niveau le plus proche de l'utilisateur, géré directement par les applications logicielles. Elle inclut toutes les applications déployées sur un RCSF, offrant des moyens d'interaction via diverses interfaces et, si besoin, par le biais d'un réseau étendu tel qu'Internet [12].

Parmi les protocoles d'application, on peut mentionner :

- SMP (Protocole de Gestion des Capteurs), employé pour la surveillance des capteurs.
- TADAP (Protocole d'Attribution de Tâches et de Transmission de Données), favorisant l'attribution des tâches et le partage des informations.

I.6 Consommation d'énergie dans les RCSF :

L'établissement d'un système énergétique pour les capteurs commence par une analyse détaillée de la consommation énergétique d'un nœud de capteur sans fil.

Cette évaluation est essentielle pour détecter d'éventuels soucis et optimiser de manière efficace la gestion de l'énergie. La consommation d'énergie d'un capteur est principalement fondée sur trois opérations clés : la détection, le traitement des informations et la transmission.

I.6.1 Energie de capture :

Les principales sources de consommation d'énergie des nœuds lors des opérations de détection ou de capture incluent l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement du signal et l'activation du capteur représentent un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud [13].

I.6.2 Energie de traitement :

L'énergie de traitement se divise en deux catégories : l'énergie de commutation et l'énergie perdue. L'énergie de commutation dépend de la tension d'alimentation ainsi que de la capacité totale commutée lors de l'exécution des programmes. À l'opposé, l'énergie de fuite désigne la consommation d'énergie de l'unité de calcul lorsque le traitement est inactif. En général, l'énergie consommée lors du traitement est largement moindre que celle requise pour la communication [13].

I.6.3 Energie de communication :

L'énergie de communication se divise en trois composants : l'énergie réceptrice, l'énergie émettrice et l'énergie de veille. Elle est affectée par la quantité de données transmises, la distance de communication et les caractéristiques physiques du module radio. La force d'émission d'un signal affecte son efficacité : une puissance accrue étend la portée, mais entraîne aussi une consommation d'énergie plus importante. Il est important de noter que la communication représente la principale source de consommation d'énergie d'un nœud capteur [13].

I.7 Durée de vie d'un RCSF :

La durée de vie attendue est essentielle dans tout déploiement de réseau de capteurs. L'objectif des scénarios d'application classiques est de mettre en place des nœuds dans un domaine non surveillé pendant des mois ou des années.

La durée de vie d'un réseau de capteurs désigne la période pendant laquelle le réseau peut, selon les circonstances : conserver une connectivité suffisante, couvrir l'intégralité du

domaine ou maintenir le taux de perte d'information en dessous d'un certain seuil. La vitalité du système est donc connectée à la vitalité nodale, bien qu'elle puisse en diverger. La vie d'un nœud correspond à l'existence d'un des nœuds du réseau. Elle repose principalement sur deux éléments : l'énergie qu'il utilise selon le temps et la quantité d'énergie à sa disposition. La quantité principale de l'énergie est utilisée par un nœud capteur au cours de la détection, de la communication et du traitement des informations.

Elle peut être définie par la durée jusqu'à ce que le premier nœud meure. Elle peut aussi être caractérisée par la durée jusqu'à ce qu'une certaine proportion de nœuds décède. Si la quantité de nœuds défaillants excède un certain seuil, cela peut entraîner une couverture incomplète de sous-régions et/ou un partitionnement du réseau. Parmi les définitions éventuelles et suggérées dans la littérature, nous mentionnons les suivantes :

- Le temps nécessaire pour que le premier nœud utilise entièrement son énergie.
- Le temps nécessaire jusqu'à ce que le premier CH (cluster Head) consomme toute son énergie.
- La période jusqu'à ce que l'ensemble des capteurs consomment toute leur énergie.

I.8 Récupération d'énergie dans les RCSF :

I.8.1 Définition de la récupération d'énergie (RE) :

Les technologies de récupération d'énergie ont fait des avancées notables ces dernières années, augmentant leur efficacité. Des dispositifs ont été conçus pour produire un approvisionnement électrique ininterrompu à partir de différentes sources, comme l'énergie solaire ou les vibrations mécaniques. Simultanément, les dispositifs des réseaux de capteurs sans fil contemporains sont élaborés pour réduire leur consommation énergétique, leur offrant ainsi la possibilité de fonctionner pendant de longues durées grâce à l'énergie récupérée, sans subir d'interruptions de courant. Les capteurs-nœuds ont la capacité de recueillir et de convertir diverses formes d'énergie, qu'elles soient d'origine naturelle ou artificielle, en électricité, chaque type de source possédant sa propre densité de puissance [13].

I.8.2 Sources d'énergie pour la récupération énergétique :

Les technologies de récupération d'énergie ont réalisé d'importants progrès en matière d'efficacité récemment, rendant possible la conception d'appareils capables de générer une énergie permanente à partir de diverses sources, y compris l'énergie solaire et les vibrations. Nous explorons les différentes formes d'énergie pouvant provenir de sources radiantes, telles

que l'énergie solaire et les ondes radio, de sources mécaniques, incluant les vibrations, le vent, les mouvements humains et le flux d'eau, ainsi que de sources thermiques, englobant les variations de température entre matériaux conducteurs, les sources de chaleur extérieures et la friction [14].

I.8.3 Techniques de la récupération énergétique :

I.8.3.1 Énergie radiante :

L'énergie radiative émane du soleil et des ondes radioélectriques. Ces dernières années, plusieurs recherches ont été effectuées sur l'extraction d'énergie à partir des radiofréquences et de l'énergie solaire, afin de fournir de l'énergie à des réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance environnementale. Les rectennas, ou antennes de conversion, servent à recueillir les ondes électromagnétiques produites par des sources proches, telles que les téléphones portables ou les émetteurs radio. Ces signaux sont ensuite convertis en courant continu régulé grâce à un circuit redresseur, avant d'être employés par des appareils à faible consommation, comme les capteurs [15].

I.8.3.2 L'énergie solaire :

C'est une source renouvelable. Il existe deux méthodes majeures pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable : la conversion thermique, qui chauffe un liquide avant de générer de l'électricité à l'aide d'une turbine, et la conversion photovoltaïque, qui transforme directement la lumière en électricité, sans avoir besoin de composants mobiles ni d'étapes intermédiaires [16].

I.8.3.3 Énergie mécanique :

Les oscillations ou vibrations mécaniques constituent une autre source d'énergie exploitable pour alimenter les capteurs. L'énergie mécanique est fréquemment collectée à l'aide de capteurs piézoélectriques, reconnus pour générer des tensions importantes sans nécessiter de source de tension externe, grâce aux propriétés spécifiques des matériaux piézoélectriques [17].

I.8.3.4 Énergie thermique :

La transformation de l'énergie thermique repose sur le fait qu'un courant électrique est produit lorsque deux matériaux conducteurs ont une divergence de température. L'efficacité des matériaux thermoélectriques est cruciale pour l'incorporation de systèmes de récupération d'énergie thermique dans les réseaux de capteurs sans fil. Cependant, en raison des tensions et des niveaux de puissance relativement faibles d'un seul thermocouple, il est essentiel de relier plusieurs thermocouples pour accroître la tension de sortie et la puissance générée. Ces

systèmes, toutefois, conviennent mieux à la production d'électricité en grande quantité, en particulier dans les turbines à vapeur [18].

I.9 Architecture du nœud de capteur à récupération d'énergie :

La récupération d'énergie implique l'utilisation des sources d'énergie faibles disponibles dans notre environnement. Parmi celles-ci, les énergies renouvelables comme l'énergie solaire, photovoltaïque et éolienne, occupent une place cruciale à grande échelle. Avec l'augmentation des appareils sans fil, la récupération d'énergie apparaît comme une option écologique pour éviter les batteries. Les progrès réalisés dans le secteur des nanotechnologies ont également permis de créer des systèmes à la fois compacts et réactifs, capables d'utiliser de petites sources d'énergie, suffisamment puissantes pour faire fonctionner de petits capteurs sans fil. D'autres techniques de production d'énergie convertissent l'énergie mécanique ou éolienne en électricité. Ces méthodes peuvent être vues comme des sources d'énergie réglables, puisque la quantité d'énergie employée durant la conversion peut fluctuer. Un système classique de récolte d'énergie est constitué de trois composants : la source d'énergie, l'infrastructure de collecte et la charge. La source d'énergie environnante à saisir est désignée par source d'énergie. L'architecture du système de collecte comprend des dispositifs destinés à capter et à transformer l'énergie environnante en électricité. Enfin, la charge fait référence à une activité qui utilise cette énergie [19].

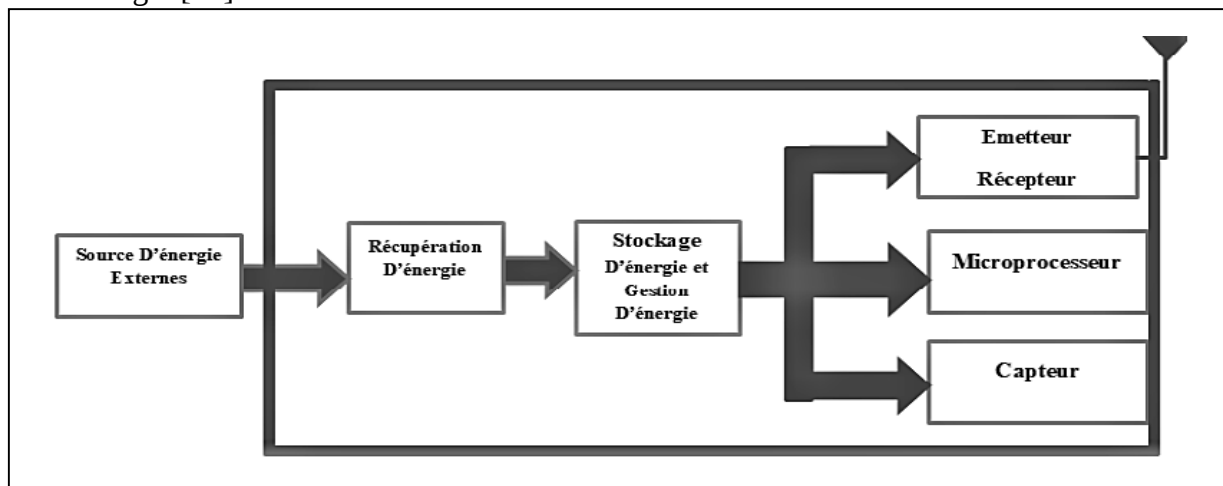


Figure 1.6 : Architecture d'un nœud capteur à récupération d'énergie.

I.10 Architecture d'un RCSF à récupération d'énergie (RCSF-RE) :

Un réseau de capteurs sans fil alimentés par énergie (RCSF-AE) est composé de capteurs autonomes utilisant des sources d'énergie renouvelables. Parmi ces sources, on retrouve des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes, des capteurs solaires, des détecteurs de

vibrations ou tout autre équipement apte à convertir l'énergie ambiante en électricité utilisable. Les capteurs en réseau se révèlent parfaits pour des usages comme la surveillance écologique, le suivi de l'intégrité des infrastructures, la gestion des ressources énergétiques, entre autres, puisqu'ils peuvent être répartis sur de vastes zones et échanger des données sans avoir besoin de câblage permanent [19].

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par exposer les concepts fondamentaux des réseaux de capteurs sans fil, en abordant leur architecture, leurs domaines d'application ainsi que leurs principales caractéristiques, notamment en matière de consommation d'énergie. Nous fournissons ensuite une définition de la récupération d'énergie, ainsi que les différentes sources de récupération d'énergie, plus la description des réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons l'état de l'art en mettant l'accent sur les protocoles de routage hiérarchique.

Chapitre II

« Le protocole de Routage Hiérarchique LEACH »

II.1 Introduction :

Les protocoles de routage occupent une position cruciale et incontournable dans la conception des RCSF, et sont influencés par un facteur déterminant qui est la consommation d'énergie, tout en préservant l'efficacité. De multiples méthodes de routage ont été créées pour les RCSF. Certaines d'entre elles viennent d'adaptations de techniques appliquées à d'autres sortes de réseaux (en particulier pour les réseaux sans fil au sens large), alors que d'autres ont été conçues spécifiquement pour les RCSF.

Dans ce chapitre, nous allons expliciter le protocole de routage hiérarchique, en présentant les diverses phases qu'il emploie, ainsi que leurs bénéfices, inconvénients et limites, ainsi que les extensions du protocole LEACH.

II.2 Définition de routage :

Le routage fait référence à la méthode utilisée pour identifier le chemin le plus efficace pour envoyer un message de son origine à sa destination. Dans un réseau de capteurs sans fil, le but essentiel d'un protocole de routage est de garantir la création efficace et sûre des chemins entre les nœuds, facilitant de ce fait la transmission des messages. Puisque ces nœuds opèrent habituellement avec des batteries ayant une durée de vie restreinte, il est crucial que le protocole de routage soit amélioré pour conserver de l'énergie. Cela nécessite de trouver un chemin qui réduit la consommation d'énergie tout en restant assez bref [20].

II.3 Différents types de routages :

Les techniques utilisées permettent de classer les protocoles de routage en fonction de la topologie du réseau. Celle-ci établit la disposition des capteurs dans le système. Dans le domaine des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), on distingue trois topologies majeures.

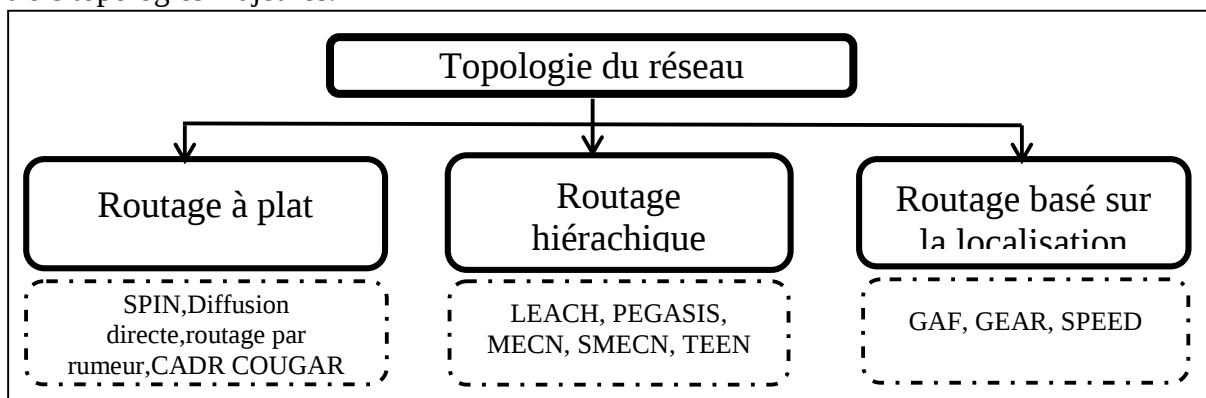


Figure 2.1 : Les types de routage

II.3.1 Routage à plat :

Dans une topologie plate, chaque nœud joue un rôle comparable. Cependant, les nœuds de contrôle, comme la station de base, ont la tâche de rassembler les données provenant des divers nœuds capteurs pour les transmettre à l'utilisateur final. La position d'un nœud dans le réseau influence sa décision de diriger des paquets vers un autre [21].

II.3.2 Routage basé sur la localisation :

Le protocole de routage basé sur la localisation se sert des données de position des nœuds pour faciliter la recherche de chemins, assurer leur entretien et contrôler le transfert d'informations. Ce système assure une diffusion ciblée de l'information, ce qui empêche la saturation du réseau. En général, les informations de localisation sont utilisées pour mesurer la distance entre deux nœuds spécifiques, ce qui aide à évaluer et à optimiser la consommation énergétique [22].

II.3.3 Routage hiérarchique :

Les protocoles de routage hiérarchiques ont été mis en œuvre en organisant les nœuds selon plusieurs niveaux de responsabilités. Parmi les techniques les plus courantes, on retrouve le clustering, qui consiste à diviser le réseau en groupes. Chaque équipe se compose d'un responsable et de ses participants [23].

II.4 Protocole de routage LEACH: Low Adaptive Clustering Hierarchy:**II.4.1 Présentation du protocole LEACH :**

LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchique les plus utilisés pour les réseaux de capteurs. Sa base repose sur l'établissement de groupes de nœuds de capteurs installés dans des zones où le signal reçu est particulièrement fort. Les chefs de cluster, également appelés cluster-heads, servent ensuite de passerelles pour transmettre les données vers leur destination finale. Cette approche améliore l'efficacité énergétique, car les envois se réalisent uniquement vers les têtes de cluster, plutôt qu'à tous les nœuds de capteurs, ce qui réduit considérablement la demande sur le réseau. Le protocole s'opère en étapes, organisées en cycles.

II.4.2 But du protocole LEACH :

Le protocole de routage hiérarchique LEACH vise principalement à réduire efficacement la consommation d'énergie des nœuds de capteurs. Il réussit à les inclure dans une communication à plusieurs sauts au sein d'un cluster, tout en effectuant l'agrégation et la fusion des données, ce qui contribue à diminuer le nombre de messages adressés à la destination. De

manière générale, la création des clusters repose sur la capacité énergétique des capteurs et leur emplacement par rapport au centre du cluster.

II.4.3 Principe de fonctionnement du protocole LEACH :

Elle est divisée en deux phases :

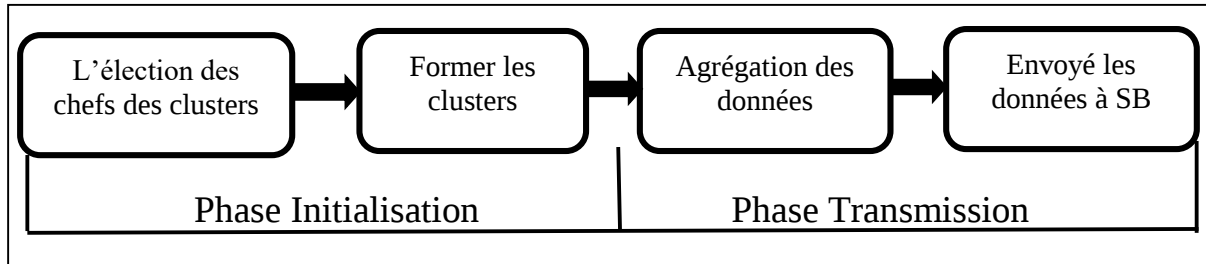


Figure 2.2 : Fonctionnement du protocole LEACH

II.4.3.1 Phase de configuration (setup phase) :

Le but de cette phase de configuration du cluster est de nommer les leaders de groupe et de définir la politique d'accès aux ressources médiatiques dans chaque ensemble. Ce processus commence par une décision locale visant à choisir le leader de cluster. Chaque nœud produit un nombre aléatoire ; si ce nombre est en dessous d'un seuil $T(n)$, le nœud est alors choisi comme leader de cluster. $T(n)$ est défini de la façon suivante :

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

Sinon 0

Avec :

- P : pourcentage désiré de clusters pendant un round.
- r : numéro du round.
- G : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élu cluster-heads pendant les $1/P$ rounds précédents.
- n : Le numéro du nœud donné. Cluster-Head

Chaque Cluster-Head (CH) choisi notifie les autres nœuds du réseau par un message de signalisation (ADV-CH). Il déclare dans ce message qu'il a été choisi comme CH pour le moment. Tout nœud non affilié (GN) recevant ce message contacte le CH concerné pour demander son adhésion. En fonction de l'intensité du signal reçu, le cluster-head est sélectionné.

Ensuite, chaque nœud non-CH envoie une demande d'adhésion (JOIN-REQ) au CH du cluster sélectionné. Le CH génère une séquence temporelle (table TDMA) après avoir reçu les messages de jonction de chaque membre du cluster. Cela lui permet d'attribuer à chaque nœud membre du cluster le créneau horaire approprié pour sa diffusion.

Dans LEACH, le TDMA est la méthode de multiplexage utilisée pour accéder au média. L'idée derrière cette stratégie est de fournir au nœud toute la bande passante pendant une période donnée. Afin de réguler les transmissions des membres, chaque CH assume la fonction de coordinateur en transmettant au préalable la table TDMA aux membres du cluster. Ainsi, chaque membre du cluster peut prédire le créneau horaire qu'il occupera et entrer en veille (sleep) pendant les périodes d'inactivité. Un schéma résumant la phase initiale de l'algorithme est présenté dans la figure 2.3 :

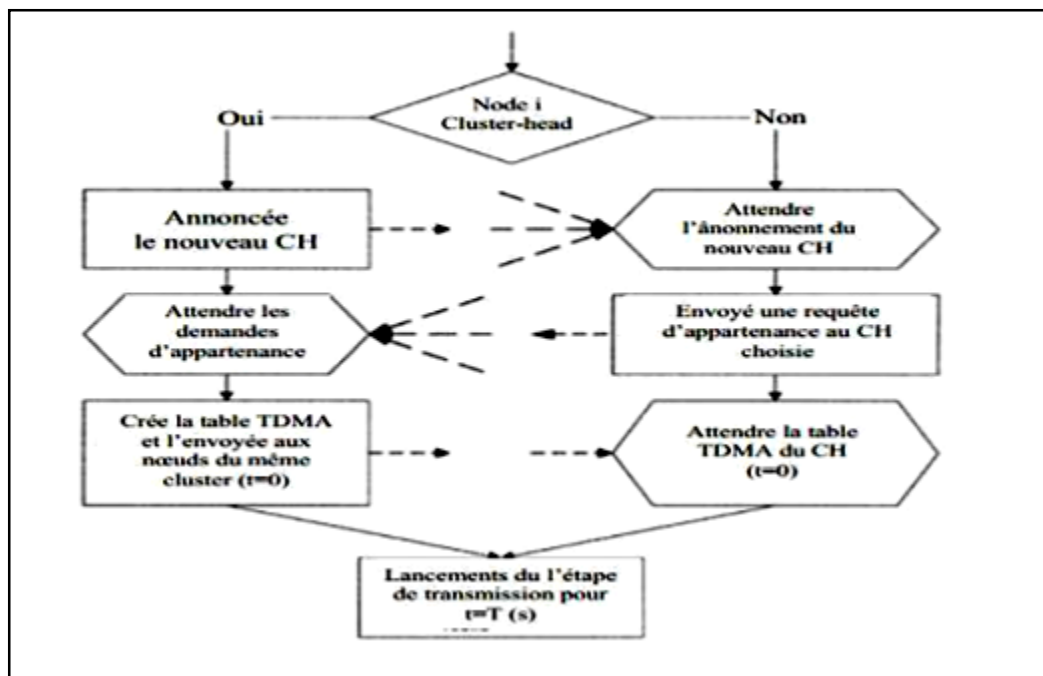


Figure 2. 3 : Phase de configuration du cluster (set-up phase)

II.4.3.2 Phase de communication (steady state phase):

Chaque nœud membre (non-CH) du cluster envoie les données collectées à son CH selon la planification TDMA. Toutes ces données sont ensuite transmises à la station de base (puits) par le CH après une procédure d'agrégation et de compression. Une rotation aléatoire de la fonction CH est effectuée après un certain temps afin d'obtenir une dissipation d'énergie uniforme dans le réseau de capteurs. Selon le modèle de simulation des auteurs, seuls 5 % des nœuds doivent fonctionner comme des CH.

De plus, LEACH envoie des données à la station de base, où la communication inter-clusters s'effectue grâce au mécanisme de multiplexage CDMA (Code Division Multiple Access) pour les canaux CH. La communication est directe (saut unique) ou indirecte (sauts multiples). Une fois cette phase terminée, un nouveau tour commence. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que chaque nœud du réseau ait été sélectionné une seule fois lors des tours précédents. Le tour est alors réinitialisé à 0.

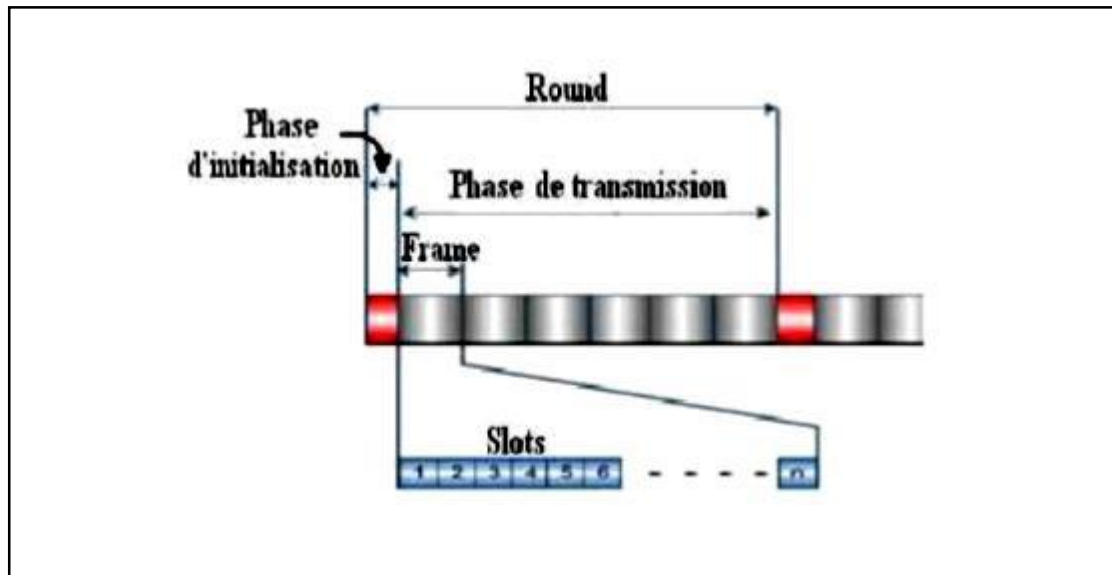


Figure 2. 4 : Temps distribué pendant la phase de transmission

II.4.4 Avantages du protocole LEACH :

- La distribution de la charge énergétique se fait entre tous les nœuds du réseau.
- L'agrégation des données contribue à diminuer la fréquence des échanges avec la station de base, surtout grâce à l'agrégation réalisée au niveau du chef de cluster.
- Une autogestion des clusters est possible.
- Protocole auto-organisateur basé sur le groupement adaptatif ;
- Rotation des rôles de chefs de groupes ;
- Faible énergie pour l'accès au média ;
- Compression locale (Aggregation).
- 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.

II.4.5 Inconvénients du protocole LEACH :

- Les nœuds éloignés du chef de cluster s'épuisent plus rapidement que ceux qui sont à proximité.
- La rotation du rôle de chef de cluster (CH) entraîne une consommation d'énergie supplémentaire.
- Les singletons, ou clusters uniques, ne comportent qu'un seul nœud qui endosse la fonction de chef de cluster, ce qui peut accélérer la décharge de sa batterie.
- En matière de sécurité, le protocole LEACH ne possède aucun mécanisme de protection intégré, ce qui le rend vulnérable aux attaques.
- La diminution de l'énergie des nœuds est liée à l'usage d'une communication à un seul saut, qui s'avère plus énergivore que la communication multi-sauts.

De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour contourner les lacunes de LEACH et trouver la meilleure solution. Pour résoudre les problèmes d'optimisation, plusieurs algorithmes heuristiques ont été conçus, notamment la méthode Firefly, les colonies d'abeilles artificielles (ABC) et les algorithmes génétiques (AG).

II.5 Extensions du protocole LEACH :

II.5.1 LEACH-C (LEACH Centralized):

Différentes versions du protocole LEACH ont été suggérées, y compris LEACH-C. Cette méthode, conçue par Heinzelman et al. A pour objectif de résoudre le problème de la sélection aléatoire des chefs de cluster (CH) dans LEACH. LEACH-C utilise une structure centralisée pour sélectionner ses chefs. Au cours de la phase d'installation, les nœuds transmettent leur position par GPS ainsi que leur niveau d'énergie à la station de base [24].

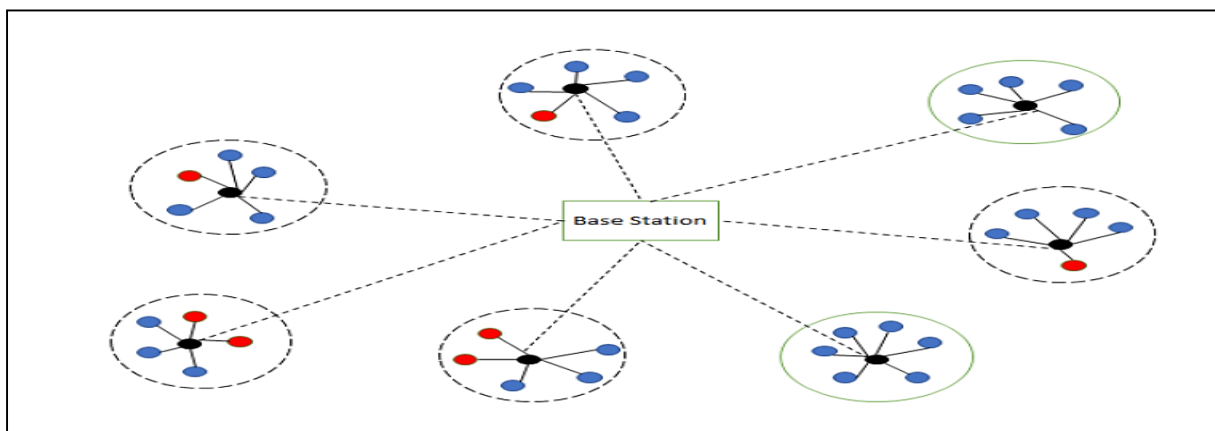


Figure 2. 5 : Le schéma fonctionnel du protocole LEACH-C

Celle-ci identifie les CH en se basant sur la moyenne des niveaux d'énergie : seuls les nœuds dont l'énergie dépasse cette moyenne peuvent être choisis comme chefs dans l'itération en cours. En définitive, la station de base transmet un message comprenant les identifiants des responsables de cluster, tandis que le déroulement des autres opérations demeure semblable à celui du protocole LEACH traditionnel.

II.5.2 V-LEACH (Vice LEACH):

Le protocole V-LEACH est une version modifiée du protocole LEACH, introduite par Muneer Bani Yassein et ses collègues. Dans ce protocole, un cluster inclut un Chef de Cluster (CH), responsable de transmettre les données collectées par les membres du cluster à la station de base (BS), et un Vice-Chef de Cluster (Vice-CH), qui est un nœud prêt à remplacer le CH en cas de panne de ce dernier. Il convient de souligner que le CH peut s'épuiser plus vite que les autres nœuds du cluster en raison de ses tâches de réception, d'envoi et de traitement des données. Lorsque le CH ne fonctionne plus, le cluster devient inactif, car les données recueillies par les nœuds ne sont plus transmises à la station de base. Le Vice-CH occupe donc une fonction essentielle, car il n'assume la responsabilité que lorsque le Chef de Cluster est indisponible. Le choix du Vice-CH se fait selon trois critères principaux : la distance minimale, l'énergie résiduelle maximale et l'énergie moyenne accessible [25].

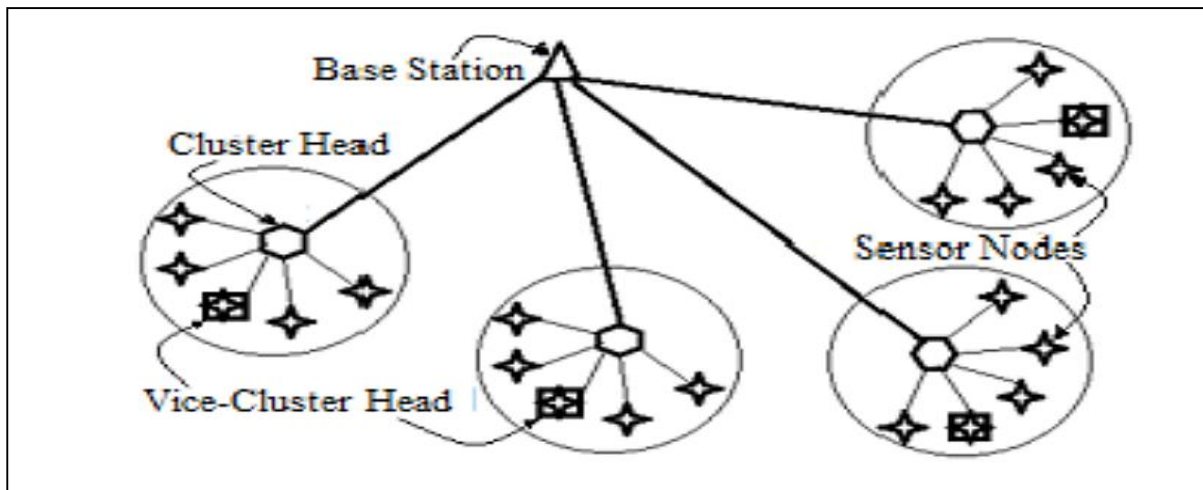


Figure 2. 6 : Le schéma fonctionnel du protocole V-LEACH

II.5.3 YA-LEACH (Yet Another LEACH):

Dans [26], les auteurs proposent un autre protocole LEACH (YA-LEACH) qui utilise la formation centralisée de clusters pour garantir des clusters optimaux et permettre aux têtes de cluster (CH) d'étendre leur fonctionnement à plusieurs rounds afin d'économiser de l'énergie. De plus, il disposera d'un CH alternatif (vice-CH) qui prendra le relais lorsque l'énergie

résiduelle du CH atteint un niveau critique. Le fonctionnement du protocole YA-LEACH est basé sur les phases suivantes :

A. Set-up phase (organisation des clusters)

- 1) Sélection et formation des têtes de cluster : Lors de la phase de configuration initiale, l'approche centralisée présentée dans LEACH-C sera utilisée. Les clusters optimaux seront formés par la méthode de recuit simulé, puis communiqués aux nœuds.
- 2) Sélection des têtes de cluster vice : La sélection des vice-CH prendra en compte la distance minimale par rapport au CH, ce qui garantira une consommation d'énergie de communication minimale et une énergie résiduelle maximale nécessaire à la communication avec la BS lorsque le vice-CH prend le relais.

B. Steady-State (transmission de données)

- 1) Création d'une planification : Chaque nœud reçoit des informations sur le cluster auquel il appartient, ainsi que sur le CH et le vice-CH. Chaque nœud détermine son créneau TDMA pour la transmission de données et se met en veille jusqu'au moment de la transmission. Le CH et le vice-CH conservent la planification TDMA de tous les nœuds. Pour les rounds prolongés, la planification TDMA est envoyée par le CH, car aucun changement n'est intervenu dans les clusters.
- 2) Transmission de données : Le CH collecte les données des nœuds membres selon la planification TDMA et les agrège avant de les transmettre à la BS à la fin de round.
- 3) Prolongation du tour : C'est à ce moment que le CH décide de conserver ou non son rôle de CH pour le round suivant. À la fin de chaque round, il décide s'il doit conserver son rôle de CH. Cette décision est prise en vérifiant si l'énergie résiduelle du CH est suffisante pour agréger les données d'un round et les transférer au vice-CH. Le CH s'étend continuellement tant que l'énergie résiduelle reste supérieure au seuil.

II.5.4 TB-LEACH (Time-based Cluster selection LEACH):

Les auteurs dans [27], proposent un nouveau protocole nommé : Time-based Cluster selection LEACH (TB-LEACH). TB-LEACH modifie uniquement l'algorithme de sélection des têtes de cluster de LEACH afin d'améliorer la partition du cluster. Pour maximiser la durée de vie du réseau, le protocole doit garantir une partition équilibrée et uniforme. Pour atteindre cet objectif, le nombre de CH doit être maîtrisé et le réseau doit disposer d'une quantité optimale de CH. L'algorithme de sélection des cluster-heads est décrit comme suit :

Dans TB-LEACH, la compétition pour les cluster-heads (CH) ne dépend plus d'un nombre aléatoire comme dans LEACH, mais d'un intervalle de temps aléatoire. Les nœuds dont

l'intervalle de temps est le plus court remportent la compétition et deviennent cluster-heads. Afin d'obtenir un nombre constant de cluster-heads, un compteur est défini. Lorsque le compteur atteint la valeur spécifiée, les nœuds cessent la compétition pour les cluster-heads. Par exemple, ici, les nœuds doivent élire quatre CH. Chaque nœud du réseau génère un temporisateur aléatoire au début d'un tour. À l'expiration du temporisateur, et si le nombre de messages d'annonce de CH reçus par le nœud (CH_ADV) est inférieur à quatre, le nœud diffuse un message d'annonce de CH pour annoncer son statut de CH en utilisant un protocole MAC CSMA (accès multiple à détection de porteuse non persistant). Sinon, il ne peut pas devenir cluster-head. Une fois les CH élus, les processus suivants sont totalement similaires à LEACH. Bien entendu, cet algorithme reste un algorithme distribué, c'est-à-dire que les nœuds prennent des décisions autonomes sans aucun contrôle centralisé.

II.6 Conclusion :

Ce chapitre présente en détail le protocole LEACH, qui divise les nœuds en clusters et est considéré comme le premier protocole de routage basé sur les clusters pour les RCSF. Nous présenterons le protocole de routage IEH-EACH pour les réseaux de capteurs de récupération d'énergie dans le chapitre suivant.

Chapitre III

**« Le protocole de routage IEH-
LEACH (Improved Energy
Harvesting-LEACH) »**

III.1 Introduction :

Dans notre vie quotidienne, les RCSF sont de plus en plus utilisés. Le suivi météorologique, les champs de bataille et autres activités de surveillance environnementale sont tous importants. Cependant, la gestion de l'énergie constitue le principal obstacle aux RCSF. Traditionnellement, des batteries non rechargeables à capacité énergétique limitée étaient utilisées pour alimenter les nœuds du réseau de capteurs [28]. Une méthode alternative, appelée récupération d'énergie, a été trouvée pour répondre aux contraintes de la batterie du capteur. La récupération d'énergie est un moyen efficace et différent de recharger la batterie du nœud de capteur. Cette approche, qui peut prendre plusieurs formes, notamment mécanique, thermique, éolienne et solaire, est respectueuse de l'environnement. Dans ce chapitre, nous proposons un protocole de clustering de récupération d'énergie (IEH-LEACH : Improved Energy Harvesting-LEACH). Ce protocole repose sur l'algorithme de routage de clustering hiérarchique et exploite la quantité d'énergie récoltée. Les informations collectées auprès des nœuds capteurs sont transmises à la station de base via la tête de cluster. L'algorithme IEH-LEACH utilise les mêmes phases du protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) où la phase de configuration du cluster est modifiée.

III.2 Limitation du protocole LEACH :

Le protocole LEACH comporte plusieurs limitations majeures, surtout en rapport avec les contraintes des réseaux de capteurs sans fil [23] [29].

III.2.1 Contraintes énergétiques : Les dispositifs de détection ont une capacité énergétique limitée, typiquement fonctionnant avec des batteries non rechargeables. LEACH vise à diminuer la consommation énergétique en favorisant le regroupement et la rotation des chefs de cluster, néanmoins, l'usage d'énergie reste un enjeu important, surtout lors des transmissions sur de grandes distances entre les leaders de cluster et la station de base.

III.2.2 Modèle idéal peu réaliste : La version initiale de LEACH est basée sur un modèle de communication parfait (modèle du disque unitaire) où les transmissions sont sans faute tant que la distance est inférieure à une portée déterminée. Effectivement, les fluctuations du signal radio et les erreurs de transmission sont fréquentes, ce qui a un impact sur la fiabilité du protocole.

III.2.3 Sécurité inadéquate : LEACH n'offre pas de dispositifs de sécurité robustes, ce qui constitue un obstacle dans des environnements hostiles où les éléments peuvent être assaillis ou les informations modifiées.

III.2.4 Bande passante restreinte : Le protocole opère sur un support partagé doté d'une capacité limitée, susceptible de causer des collisions et des pertes de paquets, surtout dans les réseaux fortement congestionnés.

III.2.5 Sensibilité aux pannes et changements de topologie : LEACH n'assure pas une gestion efficace des défaillances de nœuds ou des modifications dynamiques de la topologie du réseau. L'absence d'un chef de cluster ou la panne d'un nœud peut nuire à la communication au sein du cluster, étant donné qu'il n'existe pas de processus solide pour un remplacement instantané ou des itinéraires de secours.

III.2.6 Équilibre imparfait dans la sélection des cluster-heads : L'élection fortuite des têtes de cluster peut occasionnellement entraîner un déséquilibre, où certains nœuds épuisent leur énergie plus vite que d'autres, ce qui impacte la longévité générale du réseau. Ces contraintes ont donné lieu à des suggestions de perfectionnements et de versions alternatives de LEACH, qui visent à incorporer la qualité du lien, la résistance aux défaillances, la sécurité et une optimisation supérieure de la gestion énergétique.

III.3 Protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF-RE :

Au vu des limitations mentionnées ci-dessous, on peut conclure qu'une solution pour résoudre le problème de durée de vie des RCSF (optimisation de la consommation énergétique) est l'intégration de technologies de récupération d'énergie dans ce type de réseau, notamment l'énergie solaire, adoptée comme source d'énergie prometteuse pour alimenter les nœuds de capteurs. Certaines expériences montrent que le taux de récupération d'énergie dépend de plusieurs facteurs, dont le temps, le lieu et la source d'énergie. Cette diversité des taux de récupération d'énergie nécessite une adaptation du protocole de routage hiérarchique afin de prendre en compte les caractéristiques dynamiques du processus de récupération [30] [31]. Nous introduisons dans cette section des protocoles de routage hiérarchique destinés au RCSF-RE, dans lesquels les nœuds de capteurs collectent l'énergie nécessaire à partir de sources d'énergie ambiantes, telles que l'énergie solaire.

III.3.1 Le protocole CPEH: A Clustering Protocol for the Energy Harvesting wireless sensor networks :

Un nouveau protocole de clustering appelé CPEH (A Clustering Protocol for the Energy Harvesting) [32] a été créé spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE). Il utilise la logique floue pour créer des clusters en prenant en compte plusieurs variables, notamment la distance des nœuds par rapport à la station de base, le taux de récupération d'énergie, l'énergie résiduelle et la densité des nœuds locaux. Les chemins

optimaux entre les clusters sont déterminés grâce à l'optimisation des colonies de fourmis (ACO). Une tête de cluster fatiguée peut être remplacée par un nœud membre approprié grâce à la technique de relais de tête de cluster (CHR).

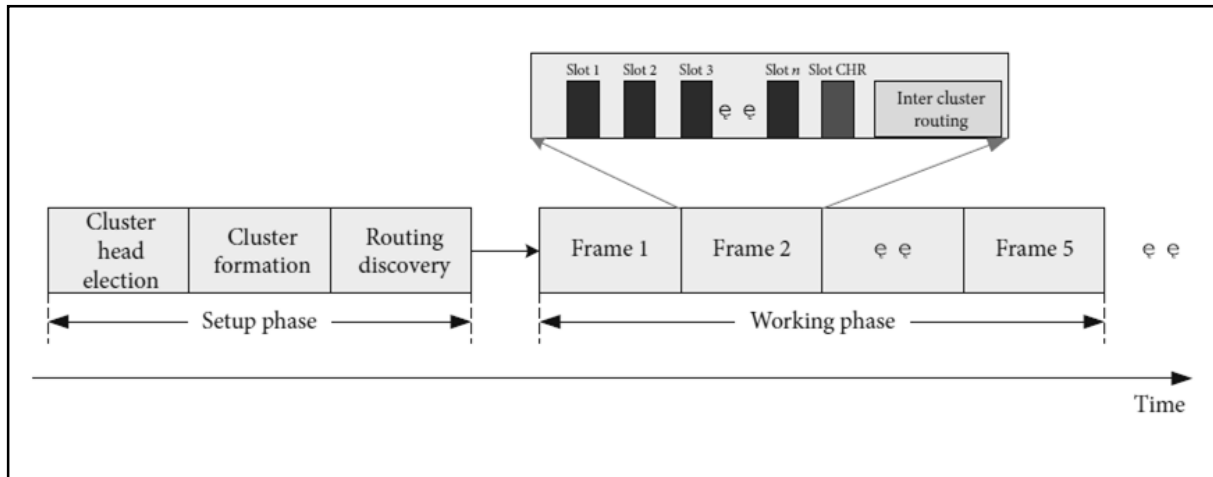


Figure 3. 1 : Le calendrier de communication de base du CPEH fonctionne par rounds

D'après les simulations, CPEH surpasse les autres protocoles en termes de performances réseau et de débit de données. Grâce à l'approche CHR, les clusters peuvent rester opérationnels même lorsque les leaders initiaux sont à court d'énergie. En conclusion, CPEH cherche à exploiter les propriétés de RCSF-RE en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle telles que la logique floue et l'optimisation des colonies de fourmis pour améliorer les performances réseau et l'efficacité énergétique, ce qui le rend idéal pour les applications industrielles.

III.3.2 Le protocole NEEC: Novel Energy Efficient Clustering :

Pour les RCSF-RE, le NEEC (Novel Energy Efficient Clustering) [33] est une technique de routage qui exploite l'énergie récoltée à partir de l'environnement pour optimiser la durée de vie et l'efficacité énergétique du réseau. Il associe des méthodes d'intelligence artificielle comme les algorithmes génétiques et la logique floue. Une phase de configuration et une phase de transmission de données constituent les deux principales étapes de son fonctionnement. À l'aide d'une fonction de fitness multi-objectifs basée sur des paramètres tels que la distance, l'énergie résiduelle et la taille des clusters, un algorithme génétique crée des clusters distribués pendant la phase de configuration en minimisant la distance entre les nœuds et les cluster-heads tout en maximisant leur durée de vie énergétique.

Ensuite, en fonction de leur valeur de fitness, les principaux nœuds cluster-heads sont sélectionnés. Grâce à un calendrier TDMA, les nœuds membres soumettent leurs données aux cluster-heads pendant la phase de transmission. Ces derniers agrègent ensuite les données avant de les envoyer à la station de base, mettant à jour l'énergie résiduelle à la fin de chaque round.

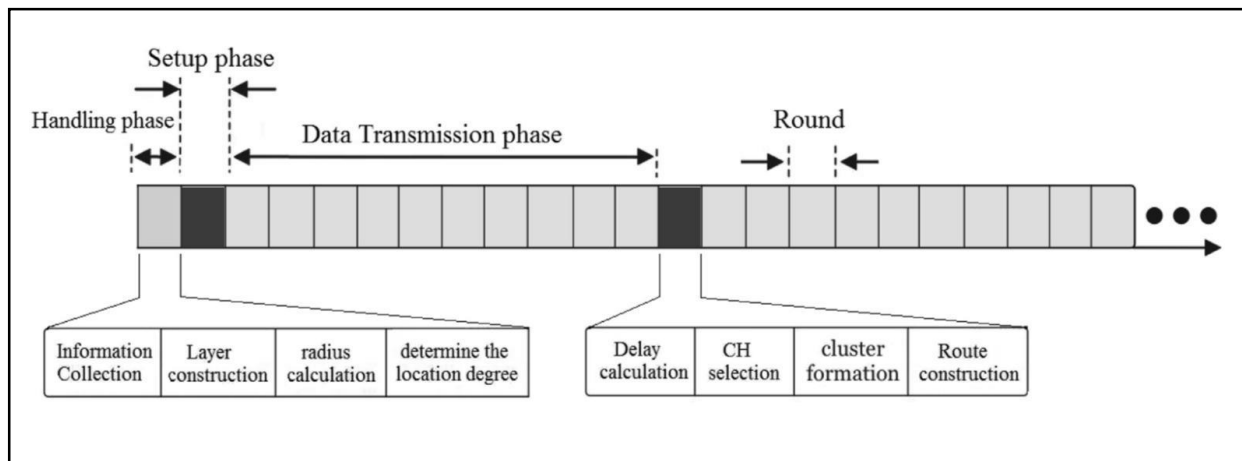


Figure 3. 2 : Le diagramme fonctionnel du protocole NEEC

Par rapport aux protocoles actuels, NEEC offre une durée de vie et une efficacité énergétique supérieures grâce à l'utilisation efficace de l'énergie récoltée, à l'optimisation de la formation de clusters distribués via des algorithmes génétiques et à l'ajustement dynamique des paramètres via la logique floue.

III.3.3 Le protocole NEHCP: Network Energy Harvesting Clustering Protocol :

La technique de routage par clustering hiérarchique est à la base du protocole NEHCP [34], qui exploite les énergies renouvelables solaires. Le cluster-head transmet les données collectées par les nœuds capteurs à la station de base. La phase initiale, la phase de configuration et la phase de transmission des données constituent les trois parties de l'algorithme NEHCP.

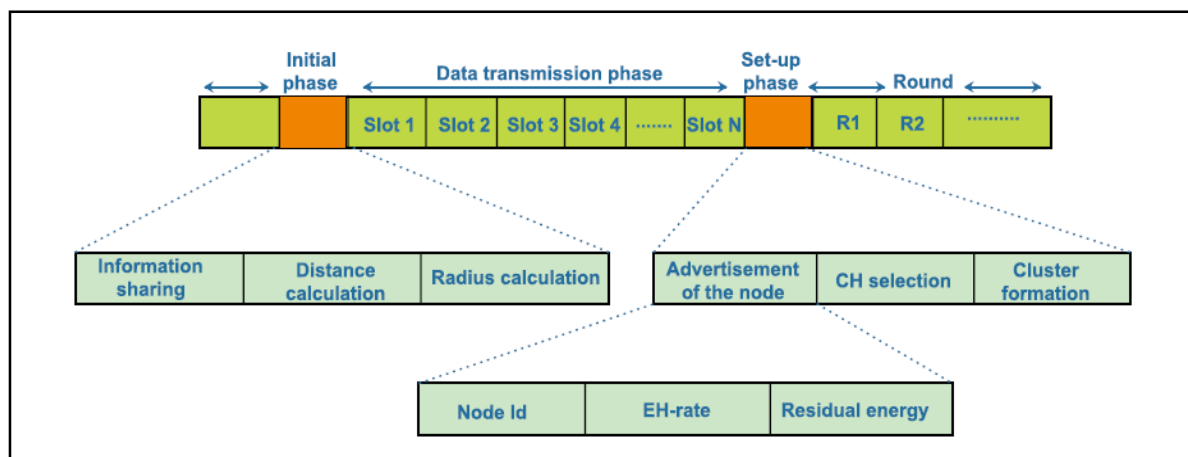


Figure 3. 3 : Le diagramme fonctionnel du protocole NEHCP

La première phase comprend trois parties : la collecte d'informations, le calcul de la distance et le calcul du rayon. Les nœuds capteurs, placés dans une zone distincte, collectent les données. Avec le système proposé, chaque nœud capteur envoie un message à chaque autre

nœud, identifiant sa position et son fonctionnement. La station de base transmet un message au réseau de capteurs afin de déterminer la distance entre elle et chaque nœud après le déploiement et l'échange d'informations.

De plus, cette distance dépend de l'intensité du signal réseau et du rapport entre les distances maximale et minimale de la SB. L'énergie résiduelle maximale et le débit de la RE pour le round en cours servent à déterminer le choix du CH. Les données sont envoyées à la SB via un routage à saut unique ou à sauts multiples après le choix d'un CH. Pour les RCSF-RE, cette approche améliore les performances du réseau tout au long de sa durée de vie.

III.3.4 Le protocole HCEH-UC : Hierarchical Cluster-based Energy Harvesting for Uninterrupted Coverage) :

En exploitant la récupération d'énergie ambiante, le protocole HCEH-UC [35] vise à optimiser la consommation énergétique totale d'un réseau de capteurs sans fil. Son principe de fonctionnement repose sur trois éléments essentiels :

1. Formation de cluster adaptative : pour améliorer la topologie du réseau et réduire la consommation d'énergie pour les communications internes du cluster, des groupes de nœuds sont formés dynamiquement en fonction de leur déploiement à l'aide d'un algorithme de clustering environnemental hiérarchique.
2. La sélection des têtes de cluster distribuées suit. Une méthode décentralisée sélectionne les nœuds responsables de chaque cluster (également appelés têtes de cluster ou CH) en fonction de leurs besoins en énergie, de leur énergie résiduelle et de leur profil de consommation énergétique.
3. Réglage du mode de fonctionnement distribué : chaque cluster dispose d'un nombre de nœuds régulé et distribué de manière adaptative en mode de récupération d'énergie. Les nœuds basculent entre le mode veille (récupération d'énergie) et le mode opérationnel (transmission de données).

L'objectif principal du protocole HCEH-UC est d'exploiter la récupération d'énergie ambiante pour assurer une couverture continue de la région cible. Le protocole vise à garantir le fonctionnement continu du réseau de capteurs en optimisant dynamiquement les responsabilités des nœuds en fonction de leur état énergétique et de la structure du réseau.

III.4 Protocole de routage IEH-LEACH : Improved Energy Harvesting-LEACH

La gestion de l'énergie est le principal problème des RCSF. Les nœuds de réseaux de capteurs conventionnels étaient souvent alimentés par des batteries non rechargeables à énergie limitée. La récupération d'énergie (RE) est une approche alternative qui s'est avérée efficace pour répondre aux contraintes de la batterie des capteurs. La RE offre un moyen pratique et innovant de recharger la batterie du nœud de capteur. Elle est respectueuse de l'environnement et plusieurs techniques de RE peuvent être utilisées, notamment mécaniques, thermiques, éoliennes et solaires. De ce fait, dans cette section nous allons décrire notre protocole proposé IEH-LEACH.

III.4.1 Présentation du protocole IEH-LEACH :

Le protocole IEH-LEACH (Improved Energy Harvesting Protocol) est une version améliorée du protocole LEACH, conçue pour être utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil pour la récupération d'énergie. Son objectif principal est d'améliorer l'efficacité énergétique des capteurs tout en prolongeant la durée de vie du réseau. Comme LEACH, il fonctionne en deux phases : la phase de formation (set-up phase) et la phase de transmission des données (steady-state phase). L'énergie récupérée lors de la première phase sert à désigner un cluster-head d'un groupe.

III.4.2 But du protocole IEH-LEACH :

IEH-LEACH a pour but d'augmenter premièrement la longévité des réseaux de capteurs et d'améliorer leurs performances de fonctionnement en améliorant la gestion de l'énergie dans le RCSF, tout en prenant en compte les capacités de collecte d'énergie des capteurs. Les caractéristiques du protocole IEH-LEACH sont les suivantes :

Structure de clustering : À l'instar de LEACH, IEH-LEACH adopte une méthode de regroupement où les capteurs sont organisés en clusters. Chaque groupe a un responsable de groupe (RG) chargé de rassembler les données des capteurs associés et de les envoyer au sink (nœud de collecte).

Optimisation de la collecte d'énergie : IEH-LEACH inclut des dispositifs pour la récupération d'énergie, permettant aux capteurs de recharger leurs batteries via des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire. Cela contribue à étendre la durée de vie utile des capteurs.

Équilibre de la charge : Le protocole applique des méthodes pour répartir la charge entre les divers chefs de cluster, ce qui diminue l'usure des capteurs et augmente l'efficacité énergétique générale du réseau.

Communication efficace : IEH-LEACH améliore les échanges entre les capteurs et le sink, ce qui réduit le nombre de transmissions requises et diminue la consommation d'énergie. En bref, IEH-LEACH est un protocole qui optimise la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en intégrant des méthodes de collecte d'énergie et en améliorant la structure de clustering, le rendant ainsi particulièrement approprié pour les applications où la durabilité et l'efficacité énergétique sont essentielles.

III.4.3 Principe de fonctionnement du protocole IEH-LEACH

III.4.3.1 Phase de configuration (set-up phase)

Création des clusters :

Au cours de cette étape, les capteurs s'organisent en groupes. Chaque capteur envoie un signal pour signaler son existence et sa capacité énergétique. Les capteurs voisins analysent ces données pour déterminer à quel groupe ils désirent s'associer.

Choix du chef de cluster :

Durant cette phase de démarrage, chaque nœud détermine indépendamment s'il deviendra chef de cluster (CH) pour le tour en cours selon son énergie résiduelle qui doit être maximale.

Lors de cette phase de configuration « setup 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 :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{E_{res-n}^{rou}}{\sum_{i=1}^n E_{res-i}^{rou}} & \text{Si } (i \in N) \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2)$$

Avec :

- i : Le numéro d'un nœud.
- rou : Le numéro du round courant.
- N : L'ensemble des nœuds de capteur du RCSF.

- n : Le numéro du nœud donné.

Un ou plusieurs capteurs sont choisis comme chefs de cluster (CH) selon des critères tels que l'énergie résiduelle, la proximité avec d'autres capteurs, ou d'autres facteurs. Cette sélection peut être faite de manière aléatoire ou selon des algorithmes particuliers afin d'assurer une distribution juste des rôles.

Annonce des responsables de cluster :

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.

III.4.3.2 Phase de communication (steady state phase)

Les procédures identiques à celles utilisées par le protocole LEACH en phase d'état stable sont conservées par notre protocole IEH-LEACH (voir section II.4.3.2 du chapitre II). La phase de transmission des données peut commencer une fois les clusters sont formés et les relations entre les nœuds et leurs cluster-heads sont établies. Chaque nœud envoie ses propres données au cluster-head durant cette phase. Après avoir reçu les données de chaque nœud de son cluster, ce dernier les agrège et les renvoie à la station de base.

Grâce à l'agrégation des données effectuée par les cluster-heads, cette phase limite le trafic réseau tout en permettant aux données collectées par les différents nœuds du réseau d'être relayées vers la station de base. Voici une description des étapes de cette phase :

Rassemblement de données : Les capteurs membres recueillent des informations sur leur milieu (température, humidité, etc.) et les transmettent à leur chef de groupe. Cette communication s'effectue habituellement à des moments réguliers pour prévenir une saturation du réseau.

Regroupement des données : Le responsable de cluster collecte les données de tous les capteurs affiliés et les regroupe afin de diminuer le volume d'informations à envoyer. Cela aide à réduire la consommation d'énergie et à améliorer la bande passante.

Transmission vers le sink : Après que les données aient été regroupées, le chef de cluster transmet les informations consolidées au sink (ou station de base), qui se trouve généralement à une distance plus grande. Cette phase est essentielle car elle contribue à diminuer la consommation énergétique en limitant le nombre de communications directes entre les capteurs et le sink.

Répétition du cycle : Au bout d'un certain temps, le protocole retourne à la phase de configuration pour choisir de nouveaux leaders de clusters et établir de nouveaux groupes, assurant ainsi une répartition équilibrée de l'énergie à travers l'ensemble du réseau.

III.4.4 Interférences entre clusters

Dans le protocole IEH-LEACH le contrôle des interférences entre les clusters est un point essentiel pour améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité des échanges.

Interférences entre les groupes dans IEH-LEACH :

De la même manière que dans LEACH, le réseau est segmenté en clusters, chaque groupe ayant un chef de cluster (cluster-head). Chaque cluster adopte un planning TDMA pour coordonner les transmissions au sein du cluster, ce qui prévient les collisions entre les membres d'un même cluster. Cependant, des interférences peuvent se produire entre des clusters adjacents, particulièrement lorsque les transmissions des cluster-heads ou des membres de clusters distincts se superposent temporellement ou en fréquence. IEH-LEACH optimise la gestion de ces interférences en incorporant des mécanismes d'allocation de ressources plus performants, comme en allouant des canaux ou des plages horaires séparés pour les communications inter-clusters. En outre, IEH-LEACH peut tirer parti de la capacité de certains nœuds à collecter de l'énergie pour adapter leur fonction et leur activité, ce qui aide à mieux répartir la charge et à réduire les interférences causées par des transmissions trop proches et simultanées. Ces améliorations aident à diminuer les collisions et les pertes de paquets entre les clusters, prolongeant ainsi la durée de vie du réseau et la qualité globale de la transmission des données.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par décrire quelques protocoles de routage hiérarchiques proposés pour les RCSF-RE avec leurs caractéristiques principales. Ensuite nous avons présenté la problématique du RCSF, puis l'objectif et le fonctionnement de notre protocole de routage IEH-LEACH.

Chapitre IV

« Simulation et Evaluation du protocole IEH-LEACH »

IV.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons la simulation et l'évaluation de notre protocole IEH-LEACH (Improved Energy Harvesting LEACH), abordé au chapitre trois. Ce protocole est basé sur le protocole LEACH et ses différents scénarios de simulation sont exposés. Nous décrirons d'abord l'environnement et les paramètres de simulation utilisés, puis nous détaillerons les résultats de ces différents scénarios utilisés en simulation.

IV.2 Objectif du travail :

L'objectif principal de notre travail est d'intégrer un module de récupération d'énergie à l'architecture de chaque nœud capteur du RCSF afin qu'ils puissent récolter l'énergie du monde extérieur et de l'exploiter dans leur fonctionnement. Le protocole IEH-LEACH exploite cette énergie pour augmenter la durée de vie et les performances du RCSF.

IV.3 Environnement de simulation :**IV.3.1 Présentation du MATLAB :**

En 1984, Math Works a créé la première édition de MATLAB (qui signifie MATrix LABoratory). Il a débuté son existence en tant que programme créé pour réaliser des calculs matriciels. Cependant, au cours des années, il s'est transformé en un système informatique adaptable capable de résoudre pratiquement tous les problèmes techniques et scientifiques.

MATLAB, est dérivé de FORTRAN, a progressé ; il est devenu un système interactif très performant, dont l'élément fondamental est la matrice qui n'exige pas de dimensionnement. Il dispose de plusieurs outils intégrés dans des boîtes à outils. Cela offre à l'utilisateur la possibilité de résoudre une multitude de difficultés informatiques et techniques très sophistiquées, notamment celles comportant des formulations vectorielles et matricielles. Il est capable de s'interfacer avec d'autres langages de programmation tels que le C, C++, JAVA et FORTRAN. MATLAB est accessible sur des systèmes parallèles et différentes plateformes (IBM, Sun, HP, Bull, DOS, Macintosh, iMac, Unix, Windows). Il existe deux éditions : édition académique et une édition professionnelle.

IV.3.2 Les caractéristiques de MATLAB :

Le simulateur MATLAB est un environnement de développement offrant un cadre hautement productif. Il comprend un ensemble d'outils et de méthodes permettant d'utiliser et d'exploiter diverses fonctions et fichiers prédéfinis, la plupart dotés d'interfaces visuelles. Il inclut

également une bibliothèque de fonctions mathématiques représentant un large éventail d'algorithmes de calcul. Cette bibliothèque inclut des opérations de base telles que l'addition, le sinus, le cosinus et l'arithmétique complexe. Elle inclut également des fonctionnalités plus avancées telles que les inverses de matrices, les transformées de Fourier rapides, les fonctions de Bessel, etc. MATLAB permet également de programmer des défis mathématiques et techniques directement sous forme de tableaux et de matrices. Il propose des instructions, une gestion et des fonctionnalités claires.

IV.4 La simulation :

Les chercheurs, les ingénieurs, les militaires et d'autres acteurs utilisent la simulation pour examiner les effets d'une action sur un élément sans mener l'expérience sur celui-ci. Au lieu d'utiliser un environnement réel, les simulations sont réalisées en environnement simulé. Tous les simulateurs permettent d'étudier le comportement d'un réseau avec une topologie et des propriétés spécifiques, même si certains sont plus complets que d'autres dans leurs résultats de simulation. Il est donc possible de prédire la topologie d'un réseau grâce aux simulateurs. Si une simulation donne des résultats médiocres, il est simple d'ajuster la topologie pour corriger les problèmes détectés par la simulation précédente.

La topologie d'un réseau peut également être créée par simulation avant sa mise en œuvre. Ceci est rendu possible grâce aux nombreux outils intégrés aux simulateurs, qui permettent des simulations très réalistes. Avant de mettre en œuvre un nouveau protocole (comme un protocole de réseau de capteurs sans fil), il peut également être testé dans un simulateur (la facilité d'intégration du simulateur étant variable).

IV.5 Paramètres de simulation et métrique de performance :

Nos expériences sont menées sur le simulateur MATLAB pour construire et tester le protocole LECAH et notre protocole IEH-LEACH de la sous-couche réseau des RCSF. Plusieurs paramètres sont introduits.

IV.5.1 Paramètres du RCSF-RE :

A. Le type de réseau utilisé et leur topologie :

Il existe plusieurs types de réseau (réseau mobile, réseau fixe ou stationnaire, etc.) avec différentes topologies sur lesquelles ils sont déployés. Dans nos travaux de simulation, nous utilisons un réseau mobile avec une topologie dynamique.

B. L'architecture du nœud de capteur utilisé :

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé un nœud de capteur sans fil reposant sur l'architecture "Récupérer-Stocker-Utiliser" décrite dans la section 1.9 du chapitre 1. 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 durée de vie et la fiabilité du réseau de capteurs.

C. Les valeurs des paramètres de simulation :

Pour évaluer notre protocole IEH-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 100 nœuds déployés de manière aléatoire dans une zone de 300 m x 300 m pendant 700 rounds 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 (0,2 joule). Les coordonnées de la station de base (Sink (ou SB)) sont fixées et définies à (0m, 0m) et la probabilité optimale d'élection des Cluster-Heads (CHs) utilisée par le protocole LEACH est de 0.1. Ainsi que la plage de récolte d'énergie utilisée allant de 0 à 50 milli joule, et une capacité maximale de batterie de 1 joule.

Paramètres	Valeurs	Unité de mesure
La surface de déploiement	(300*300)	(m*m)
Nombre de nœuds utilisés	100	-
Localisation de la station de base	(0,0)	Mètre
Énergie initiale	(0.2)	joule
Capacité maximale de la batterie	1	joule
Nombre de tours (rounds)	700	-
Plage de récolte d'énergie	[0,50]	mJ/round
Probabilité optimale de l'élection des CHs (Utilisée pour le protocole LEACH)	0.1	

Tableau 4.1 : Les paramètres de simulation.

IV.5.2 Les métriques de performance :

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

Les performances d'IEH-LEACH sont mesurées à l'aide des cinq différentes métriques suivantes :

- A. Nœuds vivants durant les rounds (nombre des nœuds vivants dans chaque round).
- B. Nœuds morts durant les rounds (nombre des nœuds morts dans chaque round).
- C. Nombre du cluster Head (dans chaque round).
- D. Nombre de paquets reçus par la station de base (nombre de paquets reçus par la SB dans chaque round).
- E. Energie résiduelle moyenne

IV.6 Description du simulateur :

IV.6.1 Interface principale :

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

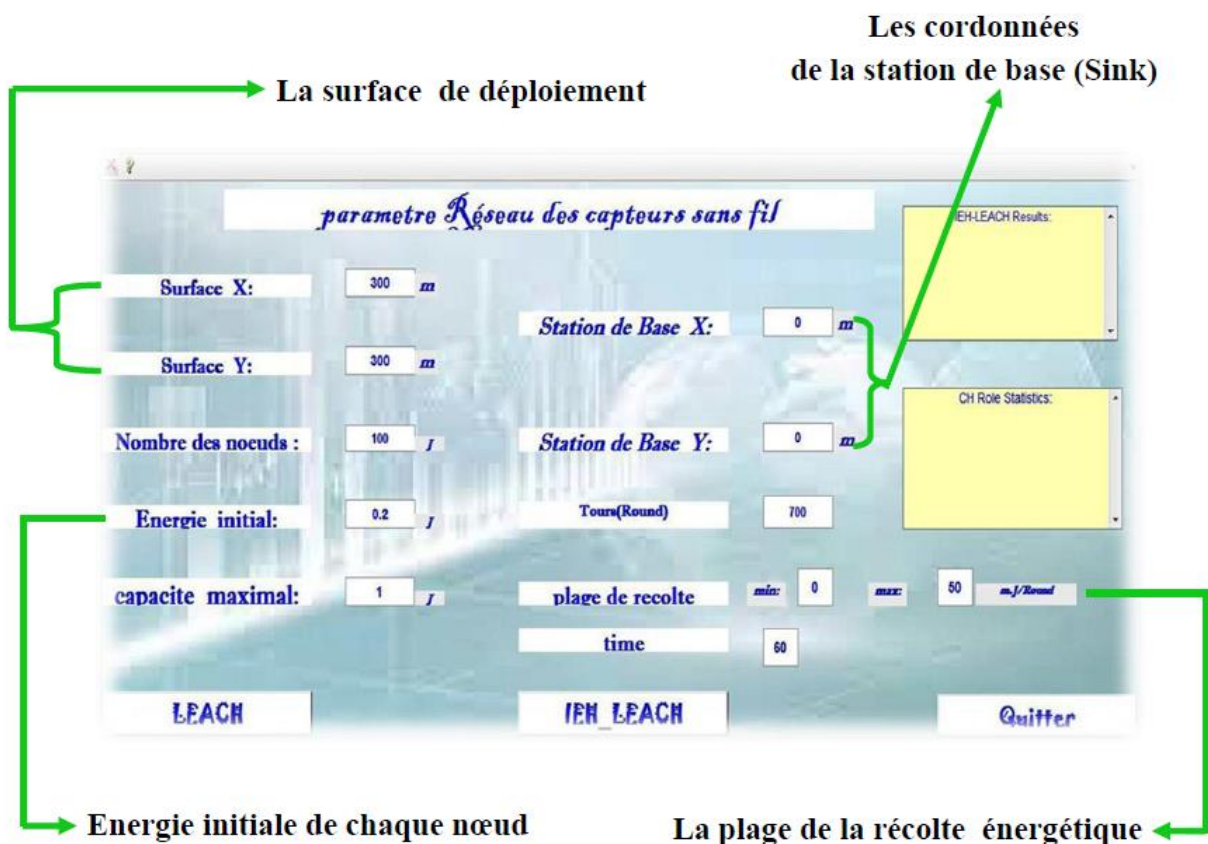


Figure 4. 1 : l'interface principale du simulateur

IV.6.2 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) en 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

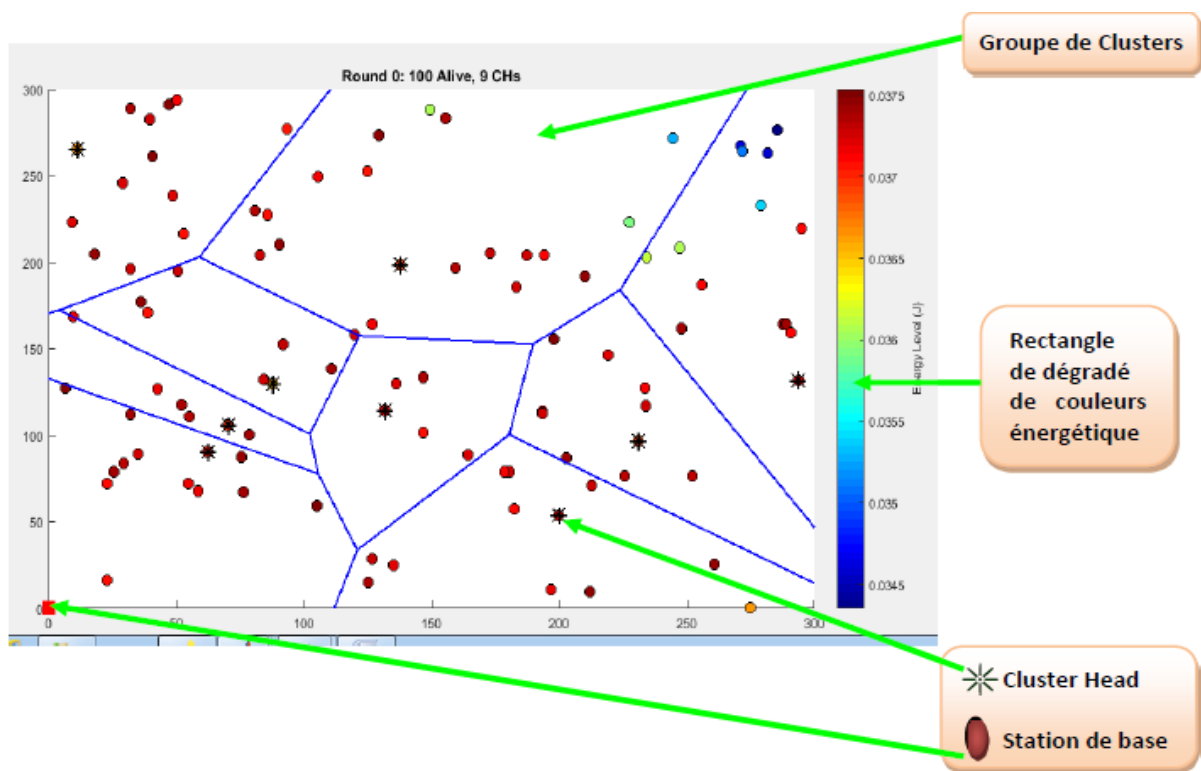


Figure 4. 2 : Déploiements des nœuds de capteur

IV.6.3 Découverte des nœuds voisins :

Dans ce protocole, les nœuds voisins sont découverts implicitement au cours de différentes étapes de simulation. Cela est particulièrement évident lors de la formation du cluster, où chaque nœud cherche à se connecter à la tête de cluster (CH) la plus proche et la plus appropriée en fonction de la distance, de l'énergie restante et de l'état de fonctionnement. Cette interaction permet à chaque nœud de découvrir ses voisins actifs (vivants) et d'évaluer la

meilleure option de fixation. De plus, lors de l'élection des CH, les nœuds candidats prennent en compte leur environnement local, ce qui aide indirectement à identifier les voisins disponibles. Ainsi, même en l'absence d'un module dédié de découverte de voisins, le protocole assure cette tâche grâce aux mécanismes de communication, de sélection et de mise à jour du réseau.

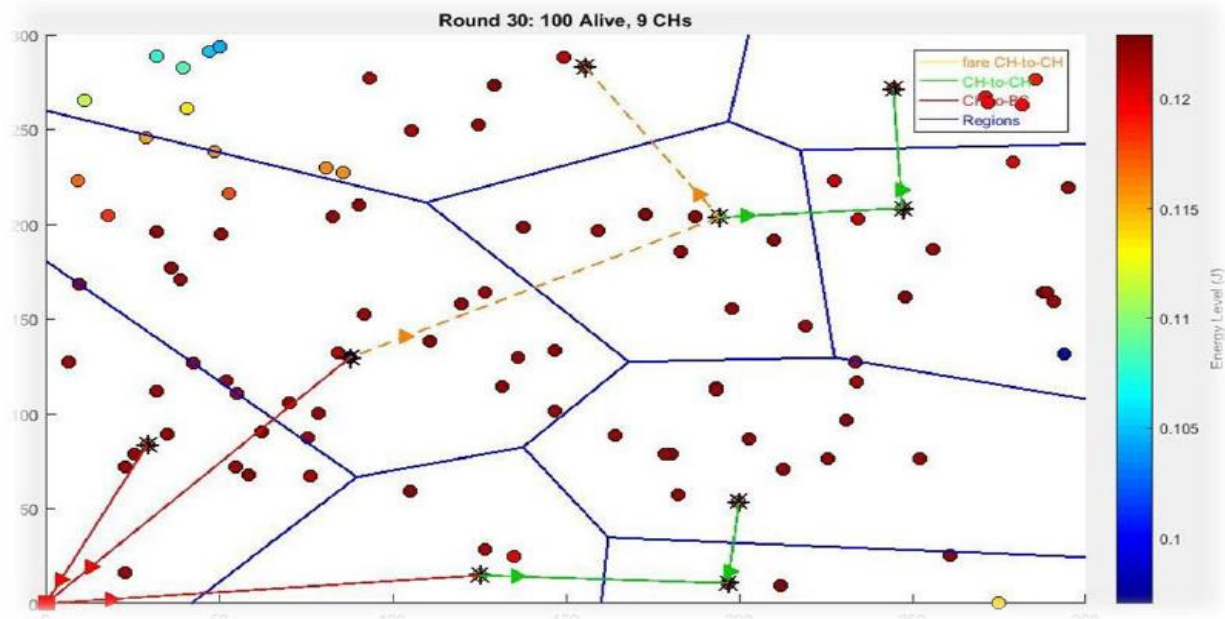


Figure 4. 3 : Découverte des nœuds voisins

IV.6.4 L'exécution du protocole IEH-LEACH :

A. Initialisation :

- Les nœuds sont dispersés de manière aléatoire dans l'area.
- Chaque nœud est configuré avec une énergie maximale () et peut récolter une quantité d'énergie à partir d'une plage de récolte énergétique définie dans le tableau 4.1.
- Une station de base (BS) est installée à un emplacement spécifique.

B. Récolte énergétique (Energy Harvesting) :

À chaque round, les nœuds opérationnels récoltent de l'énergie à partir de l'environnement externe (exemple : énergie solaire). Le taux de la récolte est défini selon le temps, et l'état du nœud.

C. Élection des chefs de cluster (Cluster-Heads (CHs)) :

Les nœuds sélectionnent de manière dynamique des CHs dans le réseau en fonction de :

- Leur énergie résiduelle,

- Leur taux de récolte d'énergie.

D. Création des groupes :

Les nœuds normaux identifient les CHs les plus proches (découverte implicite des voisins).

E. Transmission d'informations :

-Les nœuds collecteurs des données transmettent les informations au CH.

- Le CH collecte les informations et les envoie vers un autre CH (si la distance à la station de base est excessive), ou directement à la station principale.

IV.7 Évaluation des performances et comparaison :

Dans notre simulation, nous implémentons le protocole IEH-LEACH pour l'analyse et Évaluer ses performances, et les comparer avec le protocole LEACH. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

A. Les nœuds vivants durant les rounds

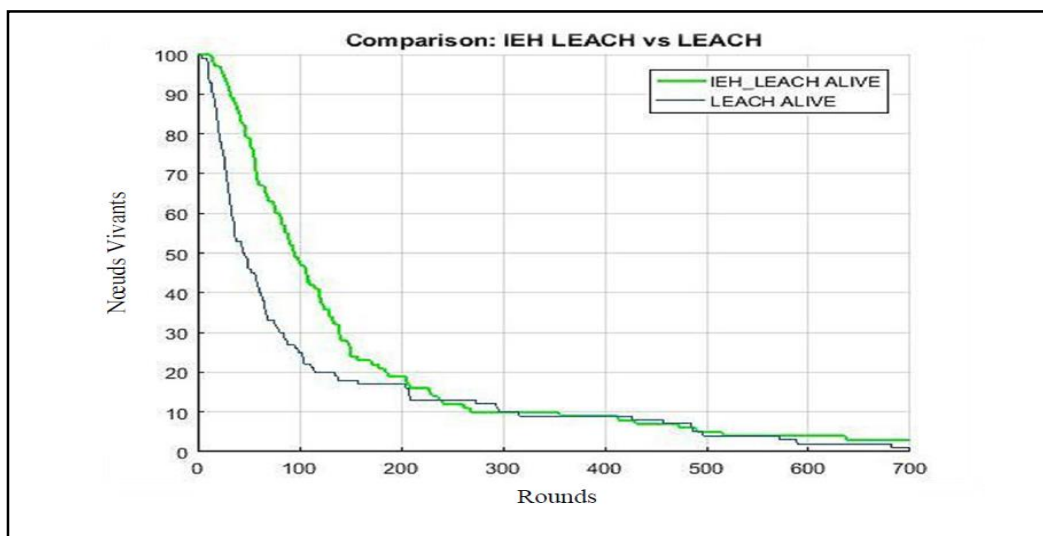


Figure 4. 4 : Nombre de nœuds vivants

La figure 4.4 montre les résultats obtenus pour la métrique des nœuds vivants avec une énergie initiale de 0,2 joule de chaque nœud pour les protocoles LEACH et IEH-LEACH. On remarque au round 100, 50% des nœuds vivants restent actifs pour le protocole IEH-LEACH contre seulement 20% pour le protocole LEACH et au round 700, IEH-LEACH maintient 4 % de nœuds opérationnels, tandis que LEACH possède 0% de nœuds vivants. De ce fait, on peut dire qu'avec IEH-LEACH reste active plus longtemps que LEACH, ce qui peut réduire les interruptions de service ainsi que améliorer la fiabilité des données collectées. Par contre, LEACH montre une dégradation accélérée, risquant des pannes prématurées. Cette supériorité

du protocole IEH-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.

B. Les nœuds morts durant les rounds

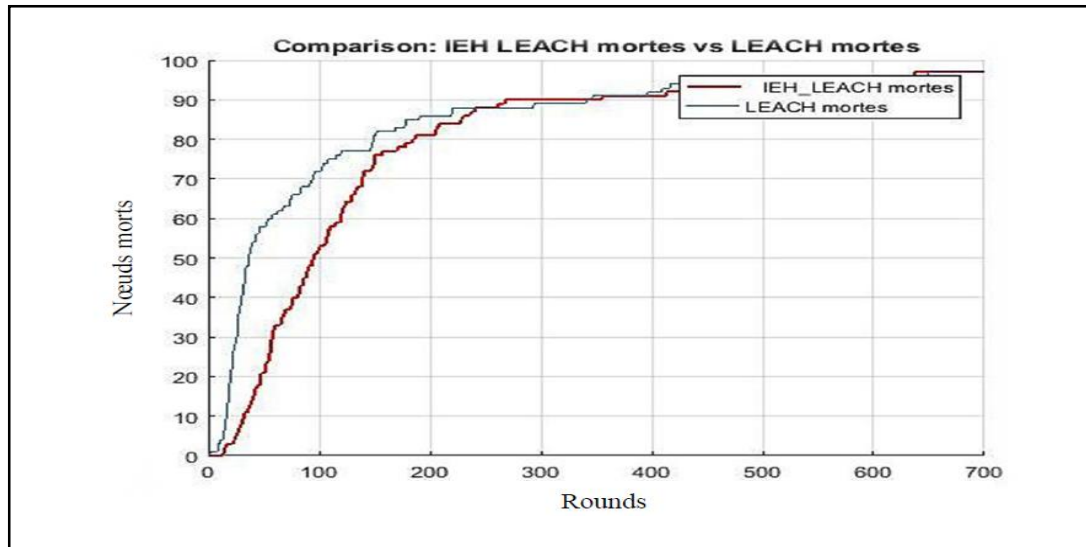


Figure 4. 5 : Nombre de nœuds morts

La figure 4.5 illustre les résultats trouvés pour la métrique des nœuds morts où chaque nœud a une énergie initiale égale à 0,2 joule pour les deux protocoles LEACH et IEH-LEACH. On observe au round 100, le taux des nœuds morts égale à 73% pour le protocole LEACH contre seulement 52% pour le protocole IEH-LEACH et au round 300, IEH-LEACH obtient 90 % de nœuds morts, tandis que LEACH possède 88% de nœuds morts. Par conséquent, on peut affirmer qu'IEH-LEACH présente moins de nœuds morts que le protocole LEACH. L'utilisation de l'énergie récoltée dans le réseau permet aux nœuds de rester actifs plus longtemps en augmentant leur efficacité énergétique, explique la puissance du protocole IEH-LEACH.

C. Le nombre de Cluster Heads (CHs) par round

La figure 4.6 montre le nombre de têtes de cluster (CH) obtenu pour les deux protocoles. Cette figure montre que la courbe est instable pour les deux protocoles. Premièrement, pour le protocole Leach, le nombre de CH fluctue considérablement d'un round à l'autre (par exemple, pics et chutes soudains). Cela est dû à la sélection aléatoire des CH, qui peut inclure des nœuds à faible énergie pouvant rapidement s'éteindre. Par exemple, après environ 300 à 400 rounds, le nombre moyen de CH diminue à mesure que les nœuds s'épuisent continuellement, réduisant ainsi la taille du réseau.

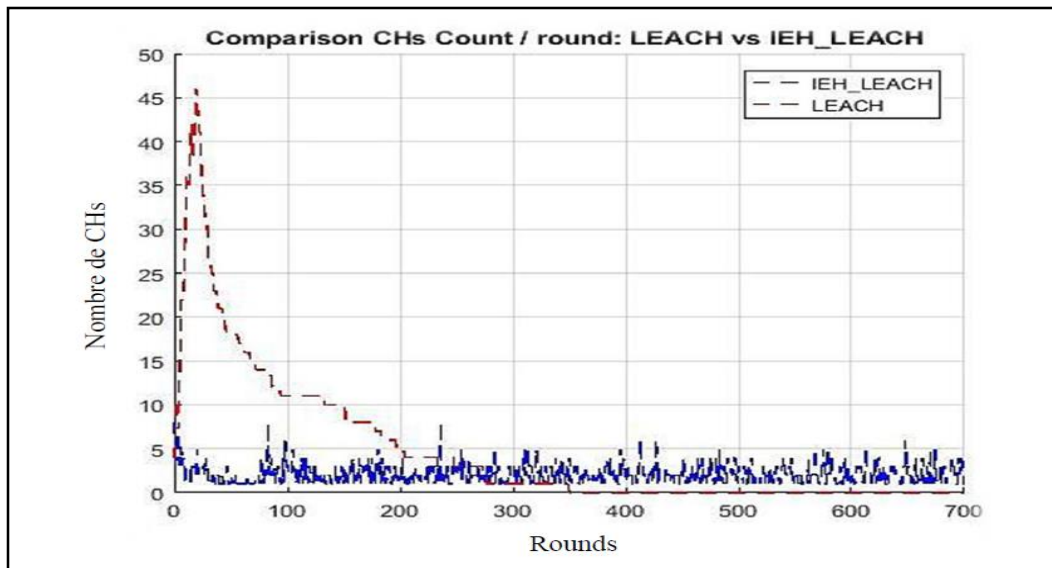


Figure 4. 6 : Nombre de Cluster Heads par round.

Deuxièmement, pour le protocole IEH_LEACH, le nombre de CH reste approximativement constant tout au long des rounds. Cela est dû à la sélection optimale basée sur l'énergie restante, ce qui permet une rotation équilibrée des CH. Nous constatons que, même après 700 rounds, la diminution n'est pas significative, ce qui démontre une gestion appropriée et équitable de l'énergie restante, qui varie en fonction de la quantité d'énergie récupérée.

D. L'énergie résiduelle moyenne

La figure 4.7 présente les résultats de la mesure de l'énergie résiduelle moyenne en fonction du nombre de tours pour les protocoles LEACH et IEH-LEACH. On observe une forte baisse de l'énergie résiduelle moyenne avec le protocole LEACH, à partir du tour 1 au tour 400. Cela est dû à la sélection aléatoire des CHs, qui entraîne l'épuisement de l'énergie prématuré de certains nœuds. De plus, les résultats montrent que le protocole IEH-LEACH présente de meilleures performances énergétiques que le protocole LEACH, l'énergie résiduelle moyenne diminuant progressivement jusqu'au tour 700. Cela est dû à la rotation intelligente du processus de sélection des CHs pour équilibrer la charge en fonction de la quantité d'énergie collectée par les nœuds du réseau.

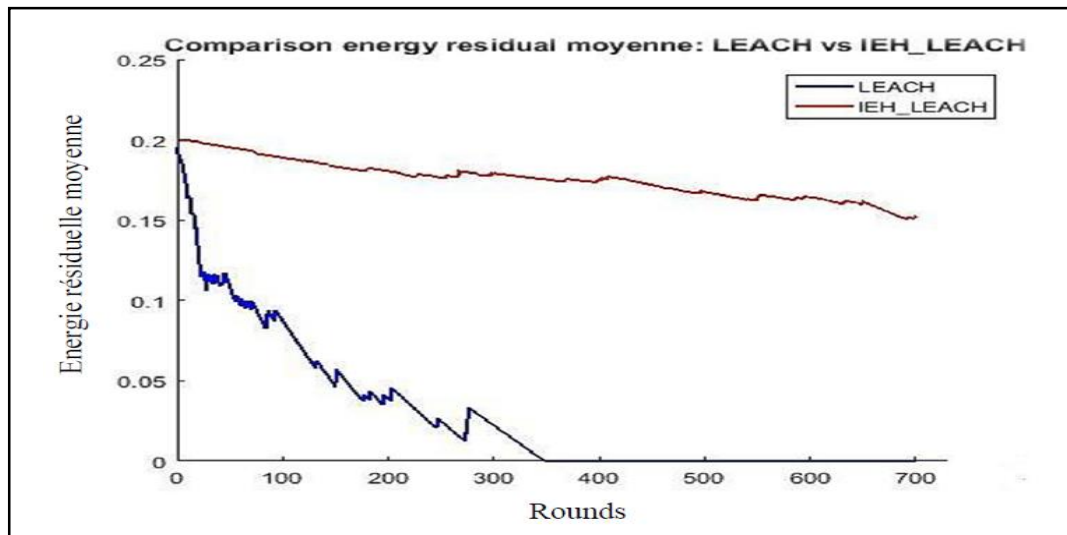


Figure 4. 7 : Energie résiduelle moyenne

E. Nombre de paquets reçus par la station de base (SB)

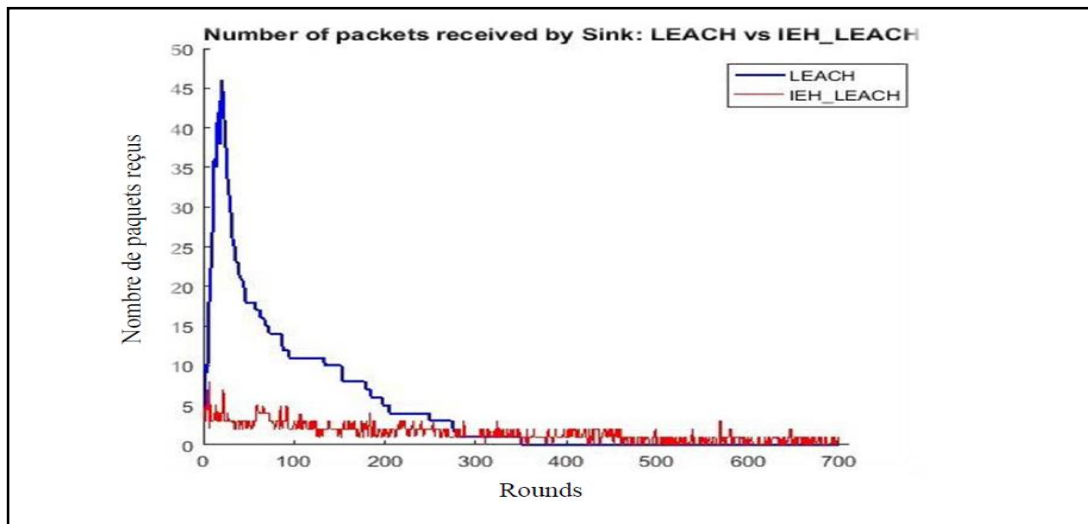


Figure 4. 8 : Nombre de paquets reçus par la SB

La figure 4.8 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 des têtes de cluster à la SB. Les résultats montrent que le protocole LEACH assure la transmission d'un grand nombre de paquets de données lors des premiers tours. Après un certain nombre de tours (à partir du tour 500), la courbe se stabilise (atteint zéro) en raison de l'épuisement de l'énergie restante de certains nœuds, ce qui entraîne une augmentation des pertes de paquets due aux déconnexions entre les nœuds du réseau. Ceci est dû à la méthode de sélection traditionnelle des CHs. Avec le protocole IEH-LEACH, en revanche, la courbe augmente rapidement et

maintient une croissance régulière jusqu'au tour 700, où la SB continue de recevoir efficacement les paquets. Cela est dû à la sélection équitable des CHs en fonction de leur énergie restante, basée sur l'augmentation de la quantité d'énergie récupérée, permettant ainsi d'équilibrer la charge entre les nœuds du réseau et d'éviter la congestion.

IV.8 Conclusion :

La problématique, l'objectif et le fonctionnement de notre protocole de routage IEH-LEACH ont été expliqués dans ce chapitre. De plus, nous avons utilisé MATLAB pour simuler notre protocole IEH-LEACH et en présenter leurs résultats de simulation. Ces derniers démontrent qu'IEH-LEACH peut améliorer les performances et l'efficacité énergétique du WSN. Ceci est dû au fonctionnement du protocole IEH-LEACH à base de l'utilisation de la récolte énergétique effectuée par les nœuds dans le réseau.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion générale :

Les réseaux de capteurs représentent un domaine de recherche très fertile et peuvent être appliqués dans de nombreux domaines. Cependant, de nombreux défis restent à relever avant leur utilisation concrète.

L'un des problèmes rencontrés dans ce type de réseau est la consommation d'énergie. Par conséquent, la conservation et la gestion de l'énergie de ces capteurs constituent un sujet de recherche ouvert. Dans nos travaux, nous nous sommes concentrés sur la problématique énergétique et sur l'utilisation de l'énergie récoltée par des sources externes (comme l'énergie solaire) et le routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons d'abord présenté leurs principaux protocoles de routage, puis ceux basés sur l'approche de clustering, et enfin ceux de clustering exploitant l'énergie récoltée. De ce point de vue, et après avoir examiné certaines limites de certains de ces protocoles, notamment le protocole L ^o ^o ^o EACH, nous avons pu le développer grâce à la technologie de récupération d'énergie en ajoutant une unité de récupération d'énergie à chaque nœud de capteur du réseau et en gérant sa consommation d'énergie résiduelle. C'est pourquoi nous avons baptisé ce nouveau protocole « IEH-LEACH (Improved Energy Harvesting-LEACH) », pouvant servir de modèle d'optimisation énergétique pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons conclu que la portée de transmission et le nombre variable de nœuds de capteurs, en tant que paramètres système, influencent la consommation énergétique totale et l'efficacité d'un réseau de capteurs sans fil.

Nous avons implémenté et simulé le protocole de clustering IEH-LEACH à l'aide du simulateur MATLAB. Pour vérifier les performances de ce protocole, nous l'avons comparé au protocole LEACH, le plus courant dans les réseaux de capteurs sans fil en termes de nombre de tours, de données envoyées au SB, d'énergie restante et de nombre de nœuds actifs et morts...etc. Les résultats de la simulation ont démontré que le protocole IEH-LEACH surpasse LEACH en offrant une meilleure efficacité énergétique, ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

Enfin nous pouvons dire que notre travail est extensible. De ce fait, plusieurs améliorations et perspectives futures restent à étudier. Entre elles, nous pouvons citer :

- Comparaison entre le protocole IEH-LEACH proposé et des algorithmes de routage hiérarchique alternatifs basés sur la récupération d'énergie.
- La simulation du protocole IEH-LEACH suggéré à l'aide d'un autre simulateur destiné aux RCSF-RE tel que OPNET, NS3,...etc.
- L'évitement de tout type de transmission longue distance (d'un CH vers le SB) en incluant le mécanisme de routage multi-sauts.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. R.Kacimi. "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil", thèse de doctorat, université de Toulouse Toulouse, France, Juillet, 2009.
- [2]. Mohamed Benazzouz. "Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil". Ecole nationale supérieure d'informatique Oued- Smar Alger Algérie - magistère IRM 2013.
- [3]. TinyOs Community Forum. [Http : //www.tinyos.net/](http://www.tinyos.net/). (Consulté le: 15/12/2024)
- [4]. Crossbow. MICA2 Data sheet. [Online] 2009.[http ://www.xbow.com/](http://www.xbow.com/). (Consulté le: 03/02/2025)
- [5]. Castelluccia, Claude et Francillon, Aurélien. "Protéger les réseaux de Capteurs sans fil." SSTIC08, 2008.
- [6]. Diery Ngom. "Sécurité optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité." Thèse de doctorat. Université de Haute Alsace France et DAKAR. 2016.
- [7]. A. Makhoul, "Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données," PhD, University of Franche-Comté, Besançon, 2008.
- [8]. M.E.KHANOUCHE, "Le traitement du problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil", thèse, faculté des sciences exactes universités A.MIRA-BEJAIA, 2008.
- [9]. https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-capteurs-sans-fil-page2.html#ref_5. (Consulté le: 16/11/2024)
- [10]. Mémoire de magister thème : Protocole de sécurité pour les réseaux de capteurs sans fil.
- [11]. Z. Bouzidi and A.Benameur, "mise en place d'un réseau de capteur sans fil pour l'irrigation intelligente", Master's thesis, Mémorial de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en informatique, Juillet, 2012.
- [12]. Cour Networking Académie Cisco.
- [13]. W.Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks ". In the proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.
- [14]. Zhou, L. Huang, W. Li, and Z. Zhu. "Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: A Survey." J. Sensors2014, 2014.

- [15]. Raul Morais, Samuel G Matos, Miguel A Fernandes, António LG Valente, Salviano FSP Soares, PJSG Ferreira et MJCS Reis. Le soleil, le vent et l'eau coulent comme fourniture d'énergie pour les petites plates-formes stationnaires d'acquisition de données. *Ordinateurs et électronique en agriculture*, 64(2) :120-132, 2008.
- [16]. Alan Fahrenbruch et Richard Bube. *Principes fondamentaux des cellules solaires: conversion de l'énergie solaire photovoltaïque*. Elsevier, 2012.
- [17]. Winston KG Seah, Zhi Ang Eu et Hwee-Pink Tan. "Réseaux de capteurs sans fil alimentés par la récupération d'énergie ambiante (wsn-heap) : étude et défis. " 1re Conférence internationale sur les communications sans fil, les technologies véhiculaires, la théorie de l'information et les technologies des systèmes aérospatiaux et électroniques, 2009, pages 1 à 5. IEEE, 2009.
- [18]. Gongbo Zhou, Linghua Huang, Wei Li et Zhencai Zhu. Récolte de l'énergie environnementale ambiante pour les réseaux de capteurs sans fil : une étude. *Journal of Sensors*, 2014.
- [19]. 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.
- [20]. Diery NGOM. Sécurité optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité. Thèse de Doctorat. Université de Haute Alsace France et DAKAR. 2016.
- [21]. D.MAKHMOUKH, S.MELOUK. Approche de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans _l. Mémoire de Master. Université A/Mira de Béjaïa.2017.
- [22]. Rajesh Chaudhary, Sonia Vatta. A tutorial of routing protocols in wireless sensor Networks. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2014.
- [23]. Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., Balakrishnan, H., et al. « An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), 660–670, 2002.
- [24]. W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 1, no. 4, pp. 660, 2002.
- [25]. Yassein, "Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network (VLEACH)," *Int. J. Digit. Content Technol. its Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 132–136, 2009.

- [26]. W. T. Gwavava and O. B. V. Ramanaiah, "YA-LEACH: Yet another LEACH for wireless sensor networks," *2015 International Conference on Information Processing (ICIP)*, Pune, India, pp. 96-101, 2015.
- [27]. Hu Junping, Jin Yuhui and Dou Liang, "A Time-based Cluster-Head Selection Algorithm for LEACH," *2008 IEEE Symposium on Computers and Communications*, Marrakech, Morocco, pp. 1172-1176, 2008.
- [28]. Yaser Yousef, "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", thèse de doctorat en informatique, université de Haute Alsace, 2010.
- [29]. Khaled Bouchakour, "Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil : Protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy), Thèse de Magister en informatique, Ecole Nationale Supérieure de l'Informatique (ESI), 2012.
- [30]. K.Akkaya and M.Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks", *Journal of Ad Hoc Networks*, Elsevier, Vol.3, No.3, pp.325-349, May 2005.
- [31]. Mejri, N. and F. Kamoun. Algorithme de routage hiérarchique mheed à plusieurs sauts pour les grands réseaux de capteurs. In *4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications*. 2007.
- [32]. 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.
- [33]. 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.
- [34]. 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.
- [35]. 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