

Republique Algerienne Democratique et Populaire

Ministere de L'enseignement Superieur

et de la Recherche Scientifique

Universite 20 Août 1955 - SKIKDA -

Département Informatique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de
Master académique en informatique

**Spécialité : Systèmes
Informatiques**

Thème

***Etude et mise en œuvre d'un protocole
de routage hiérarchique dans les
réseaux
de Capteurs sans fil***

Réalisé par :

Benzaid Abdelghani
Benredouane Amel

Encadré par :

➤ **Professeur Monsieur**
Redjimi Mohamed

Année 2024-2025

Remerciements

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

Nous remercions Monsieur, **REDJIMI MOHAMED** 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 qui ont pris de leur temps pour juger ce modeste travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude et tout notre respect.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous les enseignants du **département informatique d'université 20 Aout 1955 Skikda** 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.

Enfin, nous tenons à remercier tous les **amis de travail en service** qui nous ont apporté leur soutien moral pendant les dernière année d'études.

في العديد من التطبيقات الحديثة، أصبح من الضروري نشر شبكات من الحساسات (العقد) في بيئات مختلفة لجمع معلومات من المحيط مثل درجة الحرارة، الرطوبة، أو الحركة.....، ثم إرسال هذه البيانات إلى محطة قاعدة مركزية (Base Station) لتحليلها واتخاذ قرارات ذكية بناءً عليها. لكن مشكلتها الأساسية في هذه الشبكات تتمثل في محدودية طاقة العقد الحسية، حيث تعتمد غالبًا على بطاريات غير قابلة لإعادة الشحن، مما يجعل من الضروري تصميم بروتوكولات توجيه فعالة من حيث استهلاك الطاقة لضمان استمرارية الشبكة لأطول فترة ممكنة.

يُعد بروتوكول **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)** من أبرز بروتوكولات التوجيه الهرمية في شبكات الاستشعار اللاسلكية، ويتميز بتقنية تقسيم الشبكة إلى عناقيد، مع تعيين رؤساء عناقيد (CHs) يقومون بجمع البيانات من العقد التابعة لهم وإرسالها إلى محطة القاعدة، مما يقلل من عدد الإرسالات ويُساهم في تقليل استهلاك الطاقة.

ومع ذلك، فإن LEACH لا يأخذ بعين الاعتبار الطاقة المتبقية في العقد ولا موقع محطة القاعدة عند اختيار رؤساء العناقيد، مما يؤدي إلى استنزاف سريع لبعض العقد وتراجع في أداء الشبكة على المدى الطويل. لمعالجة هذه القيود، نقترح في هذا العمل تحسينًا لبروتوكول LEACH الأصلي، حيث يعتمد هذا البروتوكول الجديد على نموذج لمعرفة متوسط الطاقة المتبقية لجميع العقد في كل دورة، مما يسهل في اختيار رؤساء العناقيد بطريقة أكثر إنصافًا وتوازنًا بين العقد.

بالإضافة إلى ذلك، يأخذ البروتوكول المحسن بعين الاعتبار المسافة بين محطة القاعدة وحقل العمل، مما يسمح بتكييف سلوك الشبكة وفقًا لموقع المحطة، وهو ما يُساهم في تقليل الطاقة المستهلكة في الإرسال وتحسين موثوقية الاتصال. أظهرت نتائج المحاكاة أن البروتوكول المحسن يُوفر استهلاك الطاقة بشكل أفضل نسبيًا مقارنة بروتوكول LEACH التقليدي.

تُبرز هذه النتائج أهمية دمج المعلومات الطاقوية والمكانية في تصميم بروتوكولات التوجيه لتحقيق استغلال أمثل لموارد الشبكة وزيادة فعاليتها.

الكلمات المفتاحية: حصاد الطاقة، شبكات الحساسات اللاسلكية، البيئة المتجانسة، بروتوكولات التوجيه الهرمية.

Abstract

With the rapid advancement of technology, the deployment of wireless sensor networks (WSNs) has become essential in many modern applications to monitor various environmental parameters such as temperature, humidity, or movement. These sensors collect data and transmit it to a central base station for analysis and intelligent decision-making. However, a major limitation of such networks lies in the constrained energy resources of sensor nodes, which usually rely on non-rechargeable batteries. This constraint necessitates the design of energy-efficient routing protocols to ensure the longevity and stability of the network.

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) is one of the most prominent hierarchical routing protocols in WSNs. It organizes the network into clusters, where each cluster is managed by a Cluster Head (CH) responsible for gathering data from member nodes and sending it to the base station. This mechanism significantly reduces the number of transmissions and helps conserve energy.

Despite its advantages, the original LEACH protocol does not consider the **residual energy of nodes** or the **location of the base station** during the cluster head selection process. This oversight can lead to premature energy depletion in some nodes and a subsequent degradation in network performance. To address these shortcomings, this work proposes an enhanced version of the LEACH protocol that incorporates a **mathematical model to estimate the average residual energy** across nodes in each round, enabling a fairer and more balanced cluster head rotation.

In addition, the enhanced protocol accounts for the **distance between the base station and the sensor field**, allowing for adaptive behavior based on the station's location. This improves communication efficiency and reduces energy consumption during data

transmission. Simulation results show that the proposed protocol provides **better energy efficiency** compared to the original LEACH, especially when the base station is located within the sensing area.

These findings highlight the importance of integrating both energy-awareness and spatial awareness into the design of routing protocols to optimize network resource utilization and enhance the reliability and sustainability of homogeneous wireless sensor networks.

Keywords: Energy harvesting, Wireless Sensor Networks (WSNs), Homogeneous environment, Hierarchical routing protocols

Résumé

Avec l'évolution rapide des technologies, le déploiement de réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est devenu indispensable dans de nombreuses applications modernes afin de surveiller divers paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité ou encore les mouvements. Ces capteurs collectent des données qu'ils transmettent à une station de base centrale pour analyse et prise de décision intelligente. Cependant, une contrainte majeure dans ce type de réseaux réside dans la **limitation énergétique des nœuds capteurs**, qui fonctionnent généralement à l'aide de batteries non rechargeables. Cela rend crucial le développement de **protocoles de routage économes en énergie** afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Le protocole **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)** figure parmi les protocoles de routage hiérarchiques les plus connus dans les RCSF. Il repose sur une organisation en grappes (clusters), où chaque grappe est dirigée par un **chef de cluster (CH)** chargé de recueillir les données de ses nœuds membres et de les transmettre à la station de base. Ce mécanisme réduit significativement le nombre de transmissions et permet d'économiser de l'énergie.

Néanmoins, LEACH présente certaines limites : il ne prend pas en considération **l'énergie résiduelle des nœuds**, ni **la position de la station de base** lors de la sélection des chefs de cluster. Cela peut entraîner une décharge prématurée de certains nœuds et une dégradation progressive des performances du réseau. Pour pallier ces insuffisances, ce travail propose une version améliorée du protocole LEACH intégrant **un modèle mathématique permettant d'estimer l'énergie résiduelle moyenne** des nœuds à chaque ronde, ce qui assure une sélection plus équitable et équilibrée des chefs de cluster.

De plus, le protocole amélioré prend en compte **la distance entre la station de base et le champ de déploiement**, ce qui permet un comportement adaptatif du réseau selon la position de la station, réduisant ainsi la consommation énergétique lors des transmissions et améliorant la fiabilité des communications. Les résultats de simulation ont montré que le protocole proposé permet une **meilleure économie d'énergie** comparativement à LEACH, notamment lorsque la station de base se situe à l'intérieur du champ de déploiement.

Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer à la fois **la dimension énergétique et spatiale** dans la conception des protocoles de routage afin d'optimiser l'utilisation des ressources du réseau et d'assurer sa robustesse et sa durabilité dans des environnements homogènes.

Mots-clés : Récolte d'énergie, Réseaux de capteurs sans fil, Environnement homogène, Protocoles de routage hiérarchique

Table DesMatières

Remercîment.....	I
Résumé.....	II
Table de matière.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tables.....	V
Liste d'abréviation.....	VI
Introduction générale.....	1

ChapitreI Les réseaux de capteurs sans fil

1-Introduction.....	3
2-Historique des réseaux de capteurs sans fils.....	3
3-Définition d'un RCSF	3
4-Les élément constitutifs d'un RCSF	4
5-architecture d'un nœud de capteur.....	5
6-Les domaines d'applications des réseaux de capteurs	6
6-1 Application militaires	6
6-2 Application médicales	6
6-3Application commerciales.....	7
6-4Application environnement	8
6-5 Application a la sécurité et la surveillance	8
7-Caractéristiques.....	9
8-Le modèle en couche dans le RCSF.....	10
9-Sécurité dans les réseaux sans fils.....	12
9-1 Sécurité limite.....	12
9-2 Menaces et défis de la sécurité des réseaux sans fils	12
9-3 Mécanismes de protection et sécurité	13
9-4 Défis futurs	13
10-Architecture hiérarchique.....	13
11-consommation d'énergie	14
12-protocole LEACH	15
13-Conclusion	16

Chapitre II : les protocoles de routages

1-Introduction	17
2- Définition d'un protocole de routage	17
3-Les défis de routage dans les RCSF	17
4-Clafication des protocoles de routage.....	18
4-1- Classification des protocoles de routage dans les RCSF	20
4-1.1 selon la topologie du réseau	20
4-1.2 selon la méthode d'établissement de routes.....	22
4-1.3 selon les paradigmes de communication	23
5-protocoles de routage dans les CRSF	23
5-1.Leach(low-Energy Adaptive Clustering hierarchy)	23
5-2 Leach-C	24
5-3 PEGASIS(Pozwer-Efficient Gathering in Sensor information a System).....	24
5-4 Hierarchical PEGASIS(H-PEGASIS).....	25
5-5 HEED(Hybrid Energy Effcient Distributed Clustering)	25
5-6 HEEP(Hybrid Energy Efficiency protocol)	25
5-7 TEEN(Threshold sensitive EfficentSensor Network protocol)	26
5-8 APTEEN(Adaptive thresholds ensitive Energy Efficient sensor networkprotocol)	26
6-Exemples de protocoles de routagee dans les wsn.....	27
7-Avantages et inconvénients des méthode hiérarchique	27
8-Conclusion	28

Chapitre III :le protocole de routage hiérarchique LEACH

1-Introduction	29
2-Définition	29
3-Le protocole de routage hiérarchique	29
3-1 Définition de routage	29
3-2 Le fonctionnement des protocoles de routage hiérarchique.....	30
3-3 Le protocol LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	31
3-3-1 Description	31
3-3-2Lobjectif du protocole LEACH	31
3-3-3 Le principe de base du protocole LEACH.....	31
3-3-4 Le rounds dans le protocole LEACH	32
4-Les différentes phases du protocole LEACH.....	32

4-1phase d inutilisation	32
4-2 La phase de configuration du cluster(set-up phase)	33
4-3 Phase de transmission.....	33
5-Architecture de communication de LEACH.....	34
6-Algorithmme pour le protocole LEACH.....	36
7-Les avantages et l'inconvénient et limitation de protocole LEACH.....	37
8-Modele radio pour l'analyse de l'énergie: modelé simple.....	40
9-Proposition d'optimisation le Protocol LEACH	43
10-Conclulsion	44

ChapitreVI :Simulation et Evaluation

1-Introduction	45
2-Définition du Problème.....	45
3-Les objectifs du travail	45
4-Le Protocole Propose(ou Étudié).....	46
4-1 Principes de Fonctionnement de LEACH	46
4-2 Architecture du Protocole LEACH.....	47
5- Initialisation de Réseaux et des Paramètres.....	47
6-Environnement de programmation.....	48
7-Les paramètres de simulation	49
8-résultats de simulation.....	50
8-1Deployments des nœuds de capteur	50
8-2 Simulation Dynamique.....	51
8-3 Durée de vie du réseau.....	53
8-4 Énergie résiduelle.....	54
8-5 Débit global(throughput)	55
8-6 Nombre de cluster Head par Round.....	56
8-7 Nombre de parquets envoyés s la station de base.....	57
8-8 Taux de consommation énergétique par round.....	58
9-Conclusion.....	59
Conclusion General.....	60

La liste des figures

Figure1.1: Architecture standard	04
Figure1.2: Architecture d'un nœud de capteur sans fil	05
Figure1.3: Tracé du chemin militaire	06
Figure1.4: RCSFs pour les applications sanitaires	07
Figure1.5: RCSFs pour les applications commerciales.....	07
Figure1.6: RCSFs pour les applications environnementales.....	08
Figure1.7: RCSFs pour les applications surveillance	09
Figure1.8: Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs.....	10
Figure1.9: Architecture hiérarchique.....	14
Figure1.10: Architecture hiérarchique.....	15
Figure2.1: Classification des protocoles de routage dans les RCSF.....	20
Figure2.2: Architecture de communication dans une topologie plate.....	21
Figure2.3: Topologie à base de cluster	21
Figure2.4 : Architecture de communication du protocole HEEP.....	26
Figure3.1 : Exemple de routage hiérarchique.....	30
Figure3.2 : Les différentes phases utilisées par le protocole LEACH.....	32
Figure3.3: La répartition du temps utilisée dans la phase de transmission	34
Figure3.4: Architecture communication le protocole Leach.....	35
Figure3.5: Algorithme pour le protocole LEACH.....	36
Figure3.6: La transmission et la réception dans les capteurs.	40
Figure 4.1: Matlab R2018a	48
Figure4.2: Topologie Initiale du Réseau.	50
Figure 4.3: Simulation Dynamique du Réseau (LEACH en Action).....	51
Figure4.4: Paramètres de simulation.....	53
Figure4.5: Énergie résiduelle.	54

Figure4.6: Débit global (Throughput).....	55
Figure4.7: Nombre de Cluster Heads par round.....	56
Figure4.8: Nombre de paquets envoyés à la station de base	57
Figure4.9: Nombre de paquets envoyés à la station de base.....	58

Liste des Tableaux

Tableau 2.1: Critères de classification des protocoles de routage.....	19
Tableau 2.2 : Comparaison des Protocoles de Routage dans (RCSF).....	21
Tableau 4.1 : Paramètres de simulation.....	28

La liste d'abréviations

RCSF: Réseaux de Capteurs Sans Fils

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

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

CH: Cluster Head.

EAR: Eavesdrop And Register

TDMA:Time Division Multiple Access

CDMA:Code Division Multiple Access

MATLAB : Matrix La boratory.

EH: Energy Harvesting

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

BS: Base Station

EH-WSN : Energy Harvested Wireless Sensor Networks

NEHCP: Network Energy Harvesting Clustering Protocol

CPEH: Clustering Protocol for the Energy Harvesting

NEEC: Novel Energy Efficient Clustering

EH-SEP: Energy Harvesting– Stable Election Protocol

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

WSN: Wireless Sensor Networks.

OSI:Open Systems Inter connection.

MAC: Medium Access Control

QoS :Quality of Service

TDMA : Time Division Multiple Access

CDMA : Code Division Multiple Access

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil(RCSFs) sont composés d'un grand nombre de nœuds, ils se distinguent par un déploiement dense et à grande échelle .Ces nœuds sont placés dans une zone d'observation pour recueillir des données et les transmettre à des unités de traitement via une ou plusieurs stations de base. La capacité d'auto-organisation, la collaboration, le déploiement rapide et les prix sont les critères les plus remarquables de ces réseaux.

Les réseaux de capteurs ont connu beaucoup de succès en termes de domaines d'application car il sont le potentiel de révolutionner de nombreux secteurs de notre économie et de notre vie quotidienne, y compris la surveillance et la préservation de l'environnement, le transport et l'automatisation du secteur de la santé, la modernisation de la médecine, de l'agriculture, et autres.

Problématique :

Une gestion optimale en matière de consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil est un défi majeur auquel plusieurs recherches et contributions ont été apportées. Nous discuterons dans ce mémoire quelques éléments.

Objectif :

Le routage des données dans ces réseaux doit donc être optimisé pour minimiser la consommation énergétique tout en assurant une transmission efficace des informations. Les protocoles de routage hiérarchiques ont été proposés pour relever ce défi en structurant le réseau en clusters et en réduisant la surcharge de communication. Cependant, plusieurs questions se posent :

- Comment concevoir et implémenter un protocole de routage hiérarchique efficace pour un réseau de capteurs sans fil afin d'optimiser la consommation énergétique et prolonger la durée de vie du réseau ?

Cette problématique soulève plusieurs autres préoccupations :

- Quels sont les critères optimaux pour la formation des clusters et la sélection des chefs de cluster ?

- Quels sont les compromis entre la consommation d'énergie, la tence et la fiabilité de transmission ?
- Comment évaluer l'efficacité du protocole choisi par rapport aux approches existantes ?

Si vous souhaitez préciser davantage votre angle d'étude (par exemple, un protocole spécifique comme LEACH)

Organisation du mémoire :

Chapitre 1 : présente quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 2 : présente les protocoles de routage

Chapitre 3 : présente Le protocole de routage hiérarchique **LEACH**

Chapitre 4 : présente les résultats de l'évaluation de performance de notre amélioration proposée après simulation Nous clôturons notre document par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Généralité sur les CAPTEURS Réseau Sans fil (RCSF/WSN)

1-Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les concepts liés à notre champ d'application avant de commencer la construction de notre système. Le concept et les propriétés des réseaux de capteurs sans fil seront discutés dans ce chapitre. Ces réseaux sont devenus très répandus dans divers domaines d'application tels que l'industrie, la médecine, le commerce et le domaine militaire.

2 -Historique des réseaux de capteurs sans fils

Bien qu'il y ait eu un regain d'intérêt et d'étude dans les RCSFs ces dernières années, l'utilisation de capteurs pour des services spécialisés n'est pas nouvelle. Pendant la guerre froide, le Sound Surveillance System, qui utilisait des capteurs acoustiques, a été utilisé pour identifier les sous-marins soviétiques silencieux. La Nationale Oceanographic and Atmospheric Administration utilise actuellement ces technologies pour surveiller les phénomènes océaniques. L'Advanced Research Project Agency, créée par la DARPA des États-Unis en 1969 et qui a servi de banc d'essai pour les nouvelles technologies de mise en réseau reliant de nombreuses universités et institutions de recherche, a été le précurseur de l'internet.

3 -Définition d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil peut être caractérisé comme un réseau de nœuds qui peuvent détecter des incidents de l'environnement et transférer l'information reçue du champ surveillé (p. ex., une zone ou un volume) au moyen de connexions sans fil [2]. Les données sont transmises à une station de base (aussi appelé puits ou sink) qui peut les utiliser localement ou se connecter à d'autres réseaux (comme Internet) via une passerelle. Les nœuds peuvent être statiques ou mobiles. Ils peuvent être homogènes ou non homogènes. Les nœuds transmettent les données recueillies à l'un des puits, qui les envoie ensuite à la passerelle, qui les expédie ensuite à l'utilisateur final. Du point de vue du protocole, cela signifie qu'un choix peut être fait en fonction d'un critère approprié, comme une latence minimale, un débit maximal, un nombre minimal de sauts, et ainsi de suite.

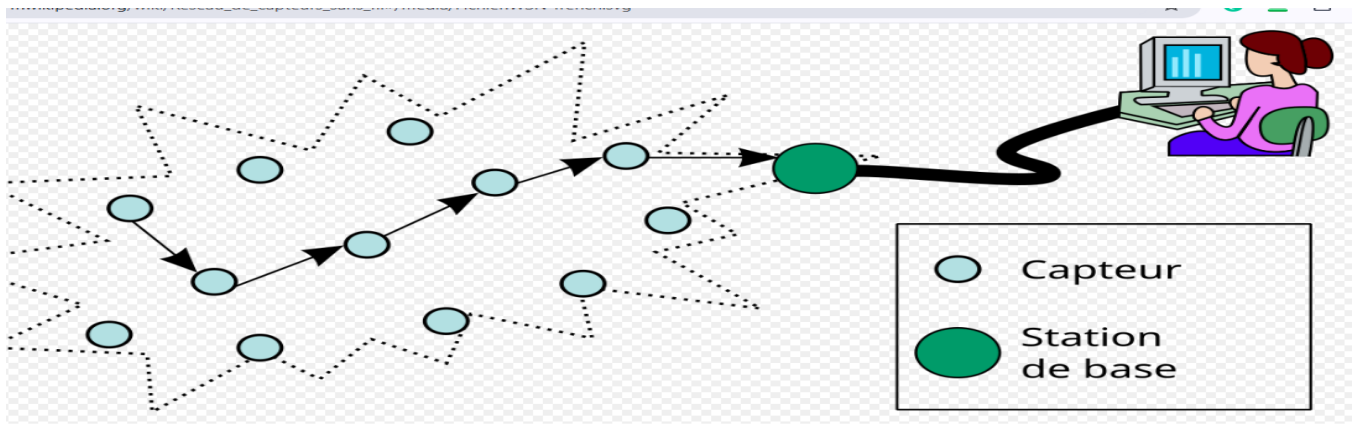


Figure 1 .1 Architecture standard [1].

4 - Les éléments constitutifs d'un RCSF

Un réseau de capteurs est souvent composé d'un grand nombre de nœuds qui sont soit mis dans une zone ou dispersés au hasard (souvent déployés par avion ou par hélicoptère). Cette dispersion aléatoire des capteurs nécessite la mise en œuvre d'algorithmes auto-organisés dans le protocole réseau de capteurs [3].

Plusieurs nœuds de capteurs, un nœud Sink et un centre de traitement des données constituent un réseau de capteurs sans fil.

- **Nœuds** : Ce sont des capteurs qui, en termes d'architecture et de dispersion géographique, répondent aux critères de l'application pour laquelle ils ont été construits.
- **Sink ou puits** : C'est un maillon crucial de la chaîne. Son travail diffère de celui des autres nœuds du réseau puisque son but est de recueillir des données des autres nœuds du réseau, c'est pourquoi il doit être constamment actif parce que la réception des données est aléatoire, et il doit avoir une quantité infinie d'énergie pour le faire.
- **Centre de traitement des données** : Toutes les données acquises par le sink seront transférées à ce centre, qui compilera et triera toutes les données afin de découvrir celles qui peuvent être exploitées.

5 - Architecture d'un nœud de capteur

Un nœud de capteur est constitué de nombreux éléments ou modules, dont chacun est responsable d'une certaine fonction telle que la collecte, le traitement ou la transmission

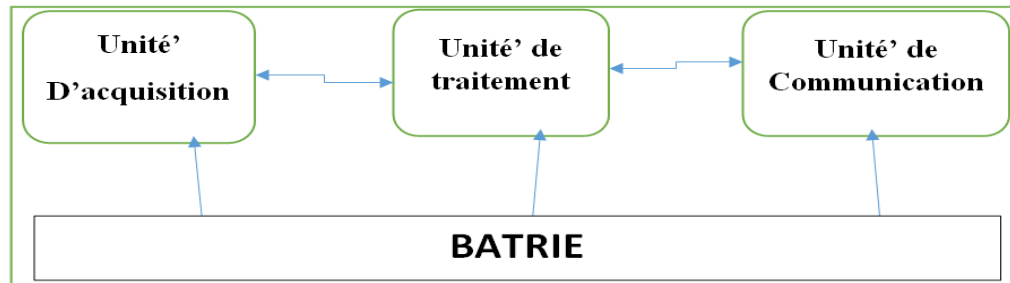


Figure 1.2 Architecture d'un nœud de capteur sans fil [02].

- ✚ **L'unité d'acquisition de données** : le principe de fonctionnement des détecteurs est souvent le même : il s'agit de répondre à l'évolution des conditions environnementales en modifiant certaines caractéristiques électriques (par exemple, pour un thermistor, une variation de température entraîne une variation de résistance). Un convertisseur analogique-numérique convertit les variations de tension afin qu'elles puissent être traitées par l'unité de traitement. Les MEMS (microsystème électromécanique) sont des structures plus complexes qui permettent de détecter un large éventail de phénomènes physiques (accélération, concentration chimique, etc.).
- ✚ **L'unité de traitement des données** : Elle se compose de deux interfaces, l'une avec l'unité d'acquisition et l'autre avec l'unité de communication, et son devoir est de gérer le bon fonctionnement des autres unités. Sur certains modèles, un système d'exploitation est nécessaire au fonctionnement du capteur peut y être installé. Cette unité permet l'exécution de procédures de communication qui permettent à un nœud de collaborer avec d'autres nœuds du réseau, elle permet également l'analyse des données recueillies afin de faciliter le travail du nœud sink.
- ✚ **L'unité de communication de données** Parce qu'il est équipé d'un émetteur-récepteur, cet appareil permet toutes les communications entre les différents nœuds.
- ✚ **La batterie** : Elle fournit de l'électricité aux appareils que nous avons décrits, cette batterie a une énergie finie et il est généralement impossible de la remplacer par

une autre. Lors de la création de protocoles pour les réseaux de capteurs

- ✚, la restriction fondamentale est la faible capacité énergétique du capteur. Des capteurs avec des composants supplémentaires, comme le système de positionnement global (GPS) [4], sont disponibles.

6 -Les domaines d'applications des réseaux de capteurs

6.1 Applications militaires

L'armée, comme beaucoup d'autres domaines, a été une force motrice derrière la création de réseaux de capteurs. Les réseaux de capteurs comprennent des propriétés telles que le déploiement rapide, le faible coût, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes qui en font un outil souhaitable dans ce domaine. Un réseau de capteurs installé sur un site Stratégique ou à accès difficile d'accès pour surveiller toutes les actions des forces ennemies ou pour étudier le terrain avant d'envoyer des soldats est un exemple d'application dans ce domaine (détection d'agent chimiques, biologiques ou radio logiques).

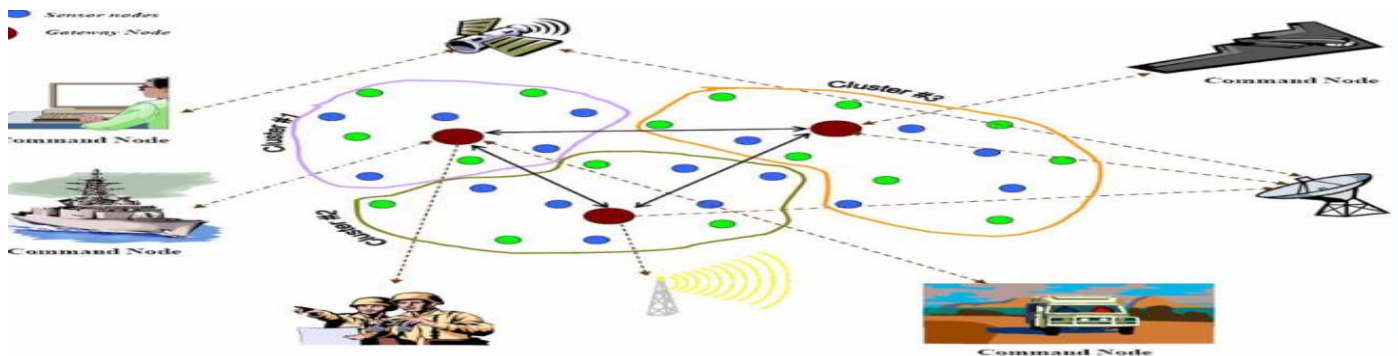


Figure 1.3 – Tracé du chemin militaire [03].

6.2 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers,...etc.).

Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladie se n'effectuant des mesures

physiologiques (la tension artérielle, battements du cœur,...etc.) à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri,...etc.) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).



Figure 1.4 – RCSFs pour les applications sanitaires [04].

6.3 Applications commerciales

Les réseaux de capteurs possèdent également d'autres applications dans le domaine commercial, parmi lesquelles on peut énumérer : la surveillance de l'état du matériel, la gestion des inventaires, le contrôle de qualité des produits, la construction des espace d'achat intelligents, le contrôle de l'environnement dans les bâtiments administratives, le contrôle des robots dans les environnements de fabrications automatiques, les jouets interactifs, les musées interactifs, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, le diagnostic des machines, le transport, la détection et la surveillance des vols de voitures, le dépistage des véhicules, l'instrumentation des chambres blanches consacrées aux traitements des semi-conducteurs,...etc.



Figure 1.5 – RCSFs pour les applications commerciales. [05].

6.4 Applications environnementales

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radio actifs, pétrole,...etc.). Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole



Figure 1.6 – RCSF pour les applications environnementales [06].

6.5 applications à la sécurité et à la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

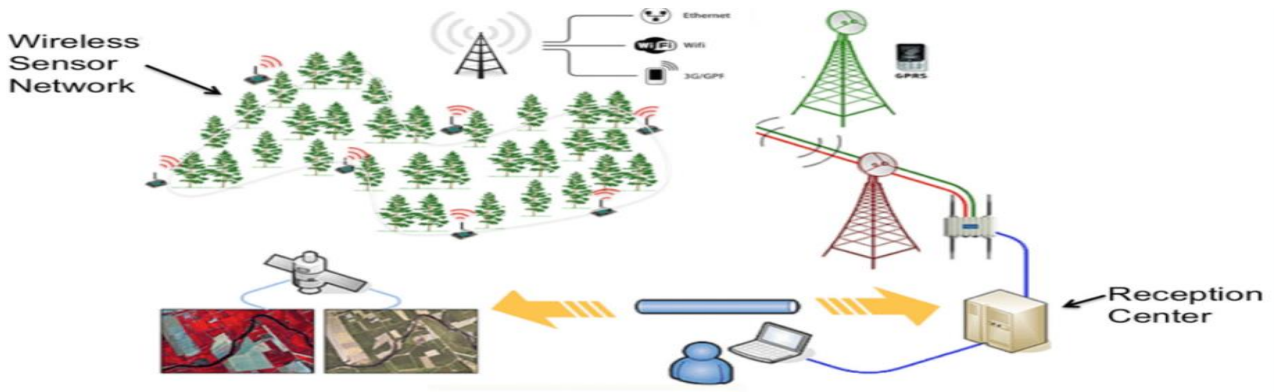


Figure 1.7 – RCSF s pour les applications surveillance [07].

7 -Caractéristiques des réseaux de capteurs

Un réseau de capteurs sans fil possède plusieurs caractéristiques [9] dont :

- Ressources limitées des capteurs en calcul, en mémoire et en énergie.
- Durée de vie limitée.
- Mode de communication direct ou en multi-sauts.
- Densité importante des capteurs qui peuvent atteindre des dizaines de millions pour certaines applications.
- Possibilité de découper le réseau en clusters et d'utiliser les capteurs comme calculateurs ou des agrégateurs.
- La coopération entre les nœuds capteurs pour les tâches complexes. Absence d'un identifiant global pour les capteurs.
- Deux modes de fonctionnement : « Un à plusieurs » où la station de base diffuse des informations aux différents capteurs ; et « Plusieurs à un » où les nœuds capteurs diffusent des informations à la station de base.
- Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
- Précision: Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie
- Rapidité: le temps de réaction d'un capteur, elle est liée à la bande passante.
- Résolution: Plus petite variation de grande mesurable par le capteur.
- Etendue de mesure: Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

8- Le modelé en couche dans les RCSF

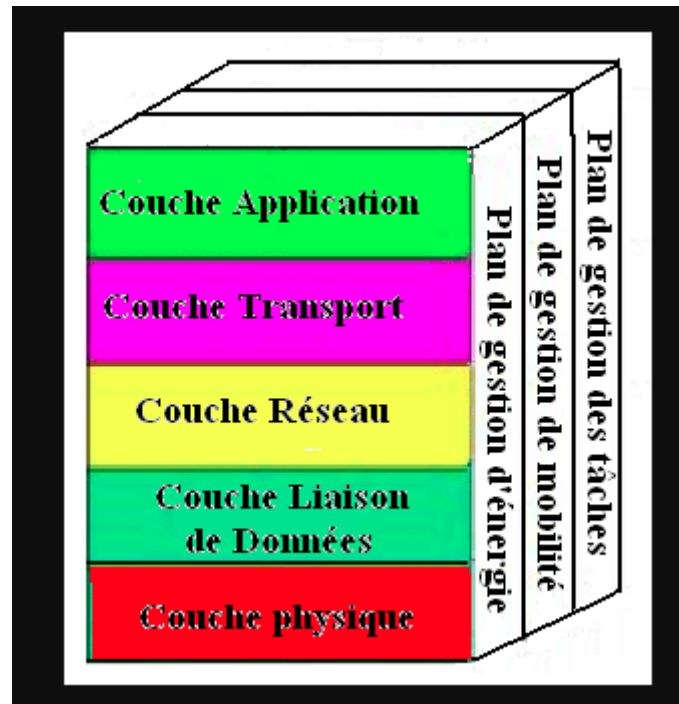


Figure 1.8 – Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs. [08].

Le rôle de ce modèle consiste à standardiser la communication entre les composants du réseau afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles.

Contrairement aux réseaux traditionnels, les réseaux de capteurs utilisent une pile protocolaire de communication composée de cinq couches (une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données et une couche physique)

qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que de trois niveaux ou plans intégrés dans la pile protocolaire pour la gestion de la puissance d'énergie, la gestion de la mobilité ainsi que la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs).

Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

Rôles des couches :

Dans ce qui suit on examinera les différentes couches qui constituent la pile protocolaire et on donnera le rôle et les fonctions de chacune d'entre elles.

Couche application :

Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau à travers des interfaces, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (Internet), pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues.

Couche transport :

Elle est responsable de l'acheminement des données, leur découpage en paquets, contrôle de flux, et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission. Cette couche est nécessaire pour que le système accède à l'internet ou à d'autres réseaux externes.

Couche réseau :

Elle s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.

Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie, délai de transmission, débit, etc.

Parmi les protocoles conçus au niveau de cette couche : LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation), etc.

Couche liaison de données

Spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs ; elle assure la liaison point à point et multipoints dans un réseau de communication.

Couche physique :

Cette couche est responsable du canal de transmission, de la sélection de fréquences, de la génération des ondes porteuses, de la détection du signal, de la modulation/démodulation des informations.

9 - Sécurité dans les réseaux sans fils

9.1. Sécurité limitée

Les réseaux WSNs sont plus vulnérables aux attaques que les réseaux filaires classiques. Car Les données sont transmises dans l'air, l'attaquant peut écouter les messages échangés(5), aussi l'application d'un bruit sur le canal peut rendre les capteurs incapables de transmettre les messages.

La sécurisation de ce type de réseau reste un problème difficile due à des contraintes comme les ressources limitée sou l'utilisation des algorithmes de sécurité nécessite des ressources de mémoires pour la mémorisation du code et des données, des ressources en énergie et en calcul.

La sécurité des réseaux sans fil est un défi majeur dans les systèmes de communication modernes. Contrairement aux réseaux filaires, ces réseaux utilisent des ondes radio pour transmettre des données, ce qui les rend plus vulnérables aux attaques.

9.2. Menaces et défis de la sécurité des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil sont exposés à plusieurs types d'attaques, notamment :

- L'écoute clandestine (Eavesdropping) : Un attaquant peut intercepter les données transmises sans être connecté physiquement au réseau.
- L'usurpation d'identité (Spoofing) : Un pirate se fait passer pour un point d'accès légitime pour tromper les utilisateurs.
- L'attaque de l'homme du milieu (Man-in-the-Middle - MITM) : Un attaquant intercepte la communication entre deux parties pour voler ou modifier les données.
- Les attaques contre les protocoles de chiffrement : Exploitation des vulnérabilités dans WEP, WPA/WPA2/WPA3 pour décrypter les communications.
- Les attaques par déni de service (Denial of Service - DoS/DDoS) : Saturation du réseau pour le rendre inutilisable.
- L'attaque du "jumeau maléfique" (EvilTwinAttack) : Création d'un faux point d'accès pour piéger les utilisateurs et intercepter leurs données.

9.3. Mécanismes de protection et de sécurité

Pour protéger les réseaux sans fil, plusieurs solutions de sécurité sont mises en place :

- Chiffrement des données: Utilisation du WPA3 qui offre un chiffrement plus robuste que WPA2.
- Authentification forte : Implémentation du 802.1X et de protocoles comme EAP-TLS pour vérifier l'identité des utilisateurs.
- Systèmes de détection et de prévention des intrusions (IDS/IPS) : Surveillance des activités suspectes sur le réseau.
- Pare-feu (Firewalls) et filtrage du trafic: Pour empêcher les connexions non autorisées. -Masquage du SSID et filtrage des adresses MAC : Pour limiter l'accès aux seuls appareils autorisés.
- Détection des anomalies via l'intelligence artificielle: Analyse du trafic pour identifier les comportements malveillants.

9.4. Défis futurs

Avec l'essor de l'Internet des objets (IoT) et des réseaux 5G, de nouveaux défis émergent en matière de sécurité :

- Protection des objets connectés, souvent vulnérables en raison de leur faible capacité de chiffrement. - Détection des attaques sophistiquées utilisant l'intelligence artificielle.
- Équilibre entre sécurité et performance pour garantir une qualité de service (QoS) optimale.

10- Architecture hiérarchique

Une architecture hiérarchique a été proposée pour réduire la complexité de la plupart des nœuds capteurs et leur déploiement, en introduisant un ensemble de nœuds capteurs plus puissants. Ceci permet de décharger la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau.

L'architecture hiérarchique est composée de plusieurs couches : une couche de capteurs, une couche de transmission et une couche de point d'accès. Cette architecture sans-fil est influencée par un certain nombre de facteurs et contraintes tels que la tolérance aux fautes, le redimensionnement, les coûts de production, l'environnement, la topologie du réseau, les contraintes matérielles, les médias de transmission et la consommation d'énergie.

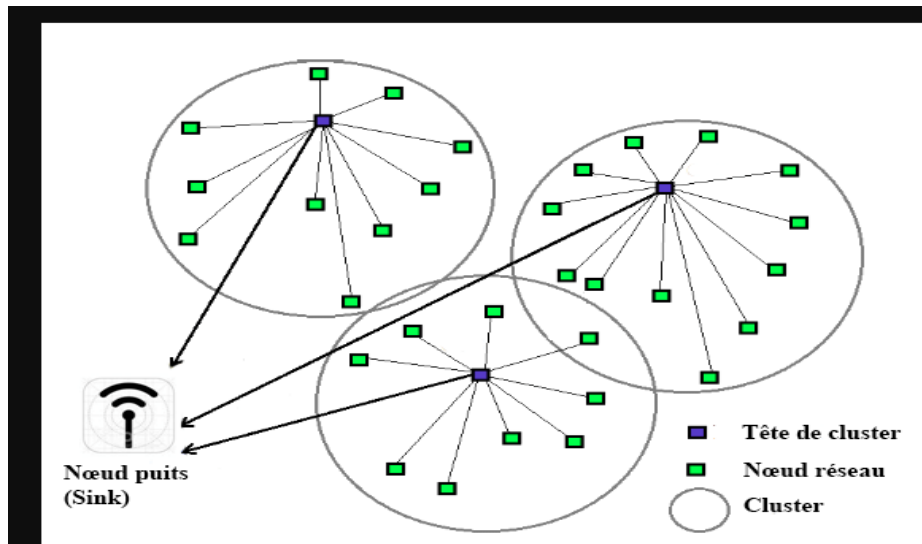


Figure 1.9 – Architecture hiérarchique [09].

11-Consommation d'énergie

Les nœuds capteurs, étant des dispositifs micro-électroniques, peuvent être équipés seulement d'une source d'énergie limitée (<0.5 Ah, 1.2 V). Dans certains scénarios d'application, il est impossible de réapprovisionner de l'énergie. La durée de vie d'un capteur est donc dépendante de la durée de vie de sa batterie.

D'autre part, la retransmission des données, la réorganisation du réseau ainsi que le changement de sa topologie rendent la gestion et la conservation d'énergie d'une haute importance. Cette énergie est consommée par les différentes unités du capteur afin de réaliser les tâches de captage, traitement de données et communication. Cette dernière est l'opération qui consomme le plus d'énergie.

12 -Protocole LEACH

LEACH (Hiérarchie de clustering adaptative à faible consommation d'énergie) est un protocole de routage basé sur le clustering, pionnier pour les WSNs. L'objectif principal de LEACH est d'augmenter l'efficacité énergétique par la sélection des CH basée sur la rotation à l'aide d'un nombre aléatoire. L'architecture du protocole LEACH est illustrée dans la **Figure1 .10**

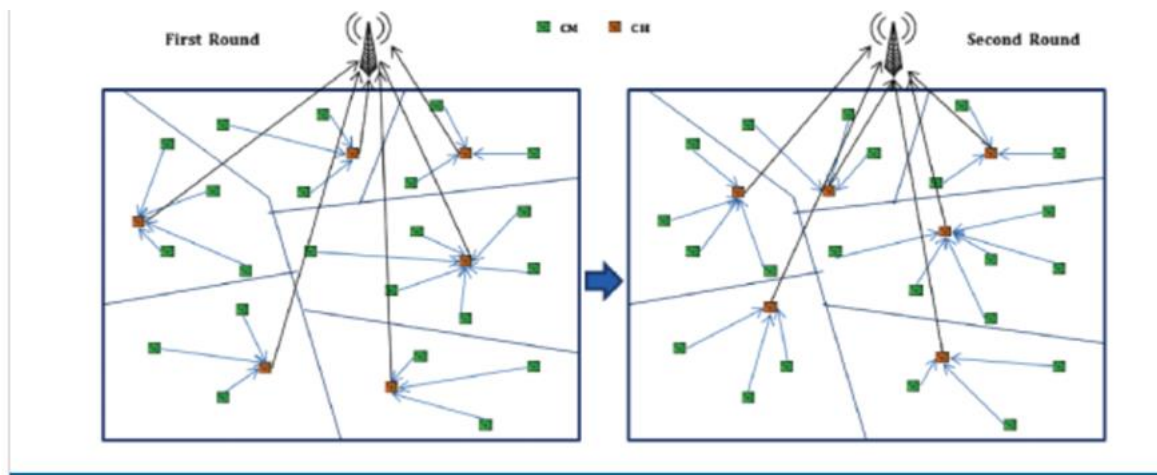


Figure 1.10 – Architecture hiérarchique [10].

13 - Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur les capteurs (définition - Les éléments– Architecture –sécurité –énergie...) et fait un tour d'horizon des RCSF. Ainsi, nous pouvons dire que le sujet des réseaux de capteurs a pris de l'importance et est un sujet de recherche relativement récent.

CHAPITRE 2

Les Protocoles de routage

1-Introduction

En général, le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné.

Le problème du routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau, suivant certains critères de performance.

Les protocoles de routage au sein des RCSF sont influencés par un facteur déterminant à savoir : la minimisation de la consommation d'énergie sans une perte considérable de l'efficacité. Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud joue le rôle de source et de relais. De ce fait, la défaillance énergétique d'un capteur peut changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier. Dans ce chapitre on va mettre en évidence quelques protocoles de routage et leurs classifications.

2- Définition d'un protocole de routage:[7]

Le routage est le mécanisme par lequel des chemins sont sélectionnés dans un réseau pour acheminer les données d'un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. Le routage est une tâche exécutée dans de nombreux réseaux, tels que les réseaux de capteurs. Il doit prendre en considération toutes les caractéristiques des capteurs afin d'assurer les meilleures performances du système : durée de vie, fiabilité, temps de réponse, ... etc.

3- Les défis de routage dans les RCSF

Il existe de nombreux protocoles de routage pour les réseaux de capteur sans fil toute fois , plusieurs défis existent dans le développement de protocoles de routage dont les principaux sont les suivants [8]:

Position du capteur : parmi les défis aux quels sont confrontés les protocoles de routage, celui qui consiste à gérer les emplacements des capteurs. La plupart des protocoles proposés supposent que les capteurs sont soit équipé de récepteur de systèmes de positionnement globaux (GPS) ou utilisent une technique de localisation.

Capacité énergétique : en plus du processeur et de la mémoire, la batterie dans le capteur à une charge limitée et peut être non rechargeable. Quand l'énergie d'un capteur atteint un seuil minimal, le nœud devient défectueux et ne sera plus capable de

fonctionner correctement, ce qui aura un impact majeur sur le réseau. Les protocoles conçus devraient économiser l'énergie pour augmenter la durée de vie du réseau tout en garantissant les performances globales.

Déploiement des nœuds :le déploiement des capteurs planifié ou aléatoire affecte les performances du routage. Pour la majorité des applications, les nœuds sont déployés aléatoirement et avec une grande densité sur des milieux inaccessibles, si le déploiement n'est pas uniforme il rend la tâche de routage trop difficile.

Agrégation des données :puisque les capteurs peuvent générer des données redondantes, des paquets similaires peuvent être agrégés afin de réduire le nombre de transmission des paquets. L'agrégation des données à pour but d'économiser l'énergie et d'optimiser le transfert des données.

4 – Classification des protocoles de routage :

Les protocoles de routage sont conçus différemment pour répondre aux objectifs d'un réseau de capteurs sans fil. Plusieurs applications des capteurs exigent un routage efficace, sécurisé et économe en énergie tout en assurant une bonne qualité de service et des temps de traitement et de transmission convenables. Le choix de la conception d'un protocole de routage pour les RCSF est assez vaste et nous pouvons les classier de différentes façons. Certaines applications des réseaux de capteurs sont mises en place pour récolter des données périodiques sur leur environnement tandis que d'autres sont chargées de répondre à des événements importants produits à l'intérieur ou à proximité de la zone à surveiller, et d'autres encore sont conçues pour capter des informations précises sur des zones ciblées.

Les techniques de transmission de données sur un réseau de capteurs sans fil diffèrent selon plusieurs critères. Le tableau ci-dessous présente une classification détaillée des protocoles de routage dans les RCSF.

Critère	Classification	Définition
Topologies du Réseaux	Hiérarchique	Le réseau est organisé en clusters . Le routage s’effectue sur plusieurs niveaux (intra-cluster et inter-cluster).
	Plat	Tous les nœud sont le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir le routage.
Les fonctions	Multi-chemins	Utiliser des chemis multiples afin d'augmenterles performances du réseau en maintenant des chemins alternatifs.
	Négociation	Eliminer les transmissions redon dantes et établir des communications selon les ressources du réseau.
	Qualitédede service	Le réseau doit satisfaire la qualité des données avec une consommation raisonnable d'énergie.
Duprotocole	Requête	Les données sont envoyées à un certains intervalles ou quand le nœud capture certains événements. Les nœuds répond en taux requêtes envoyées par la destination.
Paradigm de communication	Centré-nœuds	Les communications se basent sur l'identification des Nœuds participants.
	Centré-nœuds	Les communications se basent sur les données à Transmettre
	Basé localisation	Les communications se basent sur la position des nœuds.
Etablissement de la route	Proactif	Les chemins sont établisà priori.
	Réactive	Les chemins sont établis à la demande selon les besoins.
	Hybride	Combine les deux techniques proactive etré active.

Tableau 2.1: Critères de classification des protocoles de routage

4.1-Classification des protocoles de routage dans les RCSF [9]

Récemment, les protocoles de routage pour les RCSF ont été largement étudiés et plusieurs classifications ont été proposées.

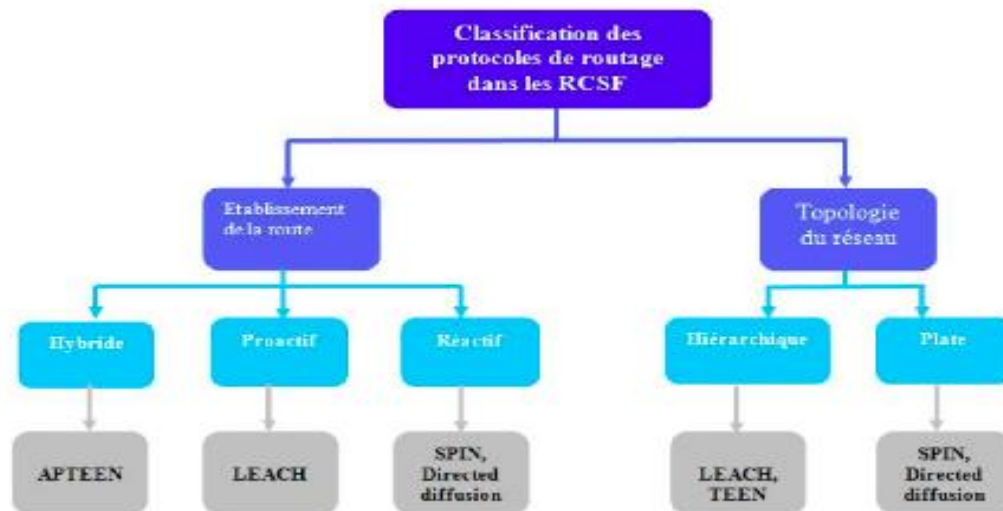


Figure 2.1: Classification des protocoles de routage dans les RCSF.

4-1.1-Selon la topologie du réseau

La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau. Globalement, il existe deux topologies dans les RCSF: La topologie plate et la topologie hiérarchique.

a. Topologie Plate :

Un réseau de capteurs sans fil plate est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et des fonctions, excepté le « Sink ». Dans ce type de topologie, les capteurs communiquent entre eux afin d'acheminer l'information au nœud centralisé (station de base). Ce processus d'acheminement d'information peut prendre deux formes : communiquer directement avec la station de base **Figure 2.2 (a)**, ou via un mode multi-sauts **Figure 2.2(b)**. De plus dans ce type de topologie Figure 2.2 (a), tous les nœuds peuvent envoyer leurs données à la station de base en utilisant une forte puissance, ceci peut conduire à la diminution de la durée de vie du réseau.

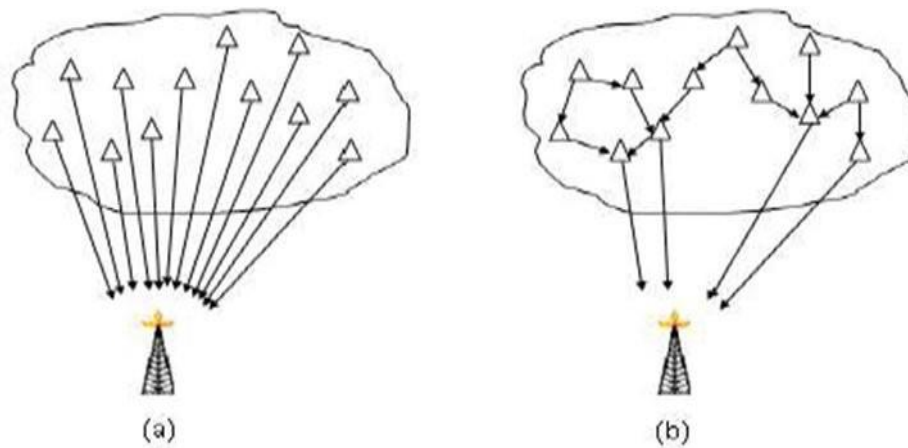


Figure 2.2: Architecture de communication dans une topologie plate.

a. Topologie hiérarchique:

Dans cette architecture, le réseau est constitué d'un ensemble de groupe de capteurs (clusters), tel qu'illustré dans la **Figure .23**. Le nœud représentant le cluster, appelé **cluster-head(CH)**, a la responsabilité de transmettre les données à la station de base. L'avantage majeur de ce type d'architecture est le prolongement de la durée de vie du réseau de capteurs. Ce résultat est atteint en désignant le cluster-head comme étant le nœud responsable de la transmission des informations (agrégées). Ce procédé est meilleur que celui où tous les nœuds envoient leurs données à un emplacement distant.

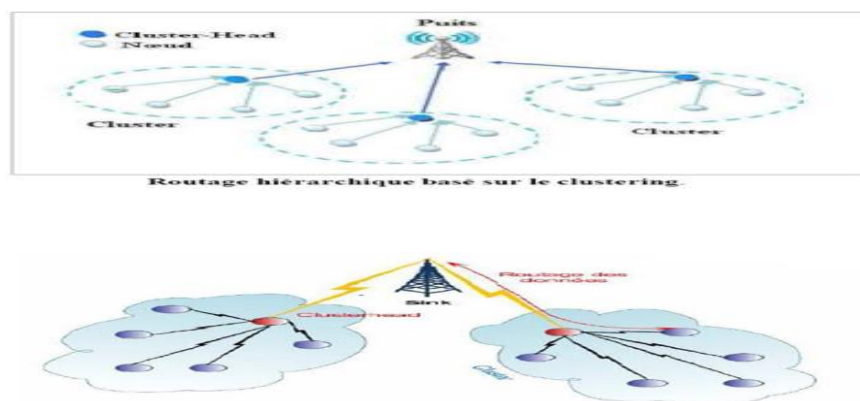


Figure 2.3: Topologie à base de cluster.

4.1.2-Selon la méthode d'établissement de routes

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage, nous distinguons trois catégories de protocoles de routages .protocoles proactifs, réactifs ou hybrides.

a. Les protocoles proactifs:

Ces protocoles de routage essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes.

Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données et par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité, et n'enclencher leur dispositif de capture qu'à des instants particuliers.

b. Les protocoles réactifs :

Ces protocoles (dits aussi, les protocoles de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée. Ce type de protocoles est pratique pour des applications temps réel où les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées. En effet, un prélèvement périodique des données aurait été inadapté pour ce type de scénarios.

c. Les protocoles hybrides:

Ces protocoles combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi ils disposent de routes immédiatement dans leur voisinage. Au-delà de la zone du voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes

4-1.3-Selon les paradigmes de communication

Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans le RSCF, il existe trois paradigmes de communication :

a. Centré –nœuds:

Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants (comme l'adresse IP). Les réseaux ad hoc utilisent ce genre de paradigme, qui s'intègre bien avec l'utilisation de ce type d'environnement. Cependant pour les réseaux de capteurs, un routage basé sur une identification individuelle des nœuds ne reflète pas l'usage réel du réseau. Pour cela, un autre paradigme dit centré-nœuds a été introduit. Ce paradigme est utilisé surtout lorsque certaines applications nécessitent une interrogation individuelle des capteurs.

b. Centré-données:

Dans les RCF, la donnée est généralement plus importante que le nœud lui-même. De ce fait, le routage et l'identification, dans ce paradigme, se font en fonction des données disponibles au niveau des capteurs. Ainsi le système peut être vu comme une base de données distribuée, où les nœuds forment des tables virtuelles, alimentées par les données captées.

Le protocole Directed Diffusion (DD) est un exemple des protocoles de routage centré-données.

c. Basé-localisation:

Dans cette approche, les positions des nœuds représentent le moyen principal d'adressage et de routage. Dans ce cas, le routage s'effectue grâce à des techniques géométriques afin d'acheminer l'information d'une zone géographique vers une autre. Ce type de mécanismes nécessite le déploiement d'une solution de positionnement dont le degré de précision requis dépend de l'application ciblée.

5-Protocoles de routage dans les RCF

5.1- Leach (Low-Energy Adaptive Clustering. Hierarchy): introduit par Heinzelman *et al.* est l'un des protocoles les plus populaires pour les réseaux de capteurs sans fil [13][14]. Le principe de ce protocole de routage est de former des groupes communs de calcul et de traitements en se basant sur la puissance du signal et le niveau d'énergie des nœuds capteurs. Chaque cluster est dirigé par un chef de cluster, jouant le rôle d'agrégateur, en effectuant des traitements sur les données reçues des nœuds du cluster et leur expédition vers la prochaine destination.

Ce rôle de chef de cluster est échangé entre les nœuds d'un cluster afin de répartir équitablement la consommation d' énergie entre eux.

Le protocole LEACH se déroule en rounds. Chaque round se compose de deux phases : Phase d'initialisation et phase de communication. La première phase consiste à définir les clusters et élire les Clusters Head (CH), la phase de communication est responsable de la transmission des données captées.

5.2-Leach-C

LEACH-C[12] est en fait une extension de l'algorithme LEACH.Ce dernier s'appuie toujours sur le clustering , d'ailleurs il en garde les principales caractéristiques à quelques différences près comme l'ajout de la méthode d'optimisation de recuit "simulé" qui sert à calculer la structure des clusters au niveau de la station de base. De plus, dans LEACH-C, la SB définit à chaque itération de l'algorithme le rôle de chaque nœud capteur, il peut être un cluster-head ou bien un nœud ordinaire

5.3- PEGASIS: (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) proposé par Lindsey et al. [13], ce protocole est l'une des améliorations de LEACH, où le réseau est vu comme un arbre, les nœuds forment des chaînes plutôt que des clusters. Un nœud transmet et reçoit uniquement les données de son voisin. Chaque nœud est considéré comme un nœud agrégateur, ses données reçues sont traitées et envoyées au prochain nœud de la chaîne. Ainsi,toutes les données capturées sont fusionnées et transmises par un seul nœud désigné pour communiquer avec la station de base. Les nœuds qui transmettent à la station de base sont choisis pour un intervalle de temps bien défini, selon la politique de remplacement Round Robin dans le but de répartir équitablement l'énergie consommée durant un round de transmission. Le principe est d'organiser le réseau sous forme d'arbre hiérarchique où les nœuds collecteurs sont considérés comme des feuilles et la station de base comme la racine. Les données captées transitent d'une feuille à la racine par des nœuds intermédiaires formant une chaîne. A la réception d'un paquet de données, le nœud intermédiaire procède à son traitement avant son expédition vers son voisin direct de la chaîne. Le dernier nœud de la chaîne (appelé leader) transmet les données fusionnées à la station de base.

5.4-Hierarchical PEGASIS(H-PEGASIS) [14]:est une révision de PEGASIS. Ainsi, il se fixe pour objectif la diminution des délais de transmissions des paquets vers la station de base, et de plus, il suggère une solution au problème de la collecte de données. La transmission simultanée de messages est adoptée dans le but de réduire les délais dans PEGASIS.

5.5-HEED: (*Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering*): propose par O. Younis *et al.* [15]. HEED est établi sur le schéma basique de LEACH. L'un de ses aspects le plus important est la méthode avec laquelle sont sélectionnés les CHs. Dans le but d'assurer un équilibrage de puissance énergétique, la construction des clusters se fait selon une combinaison de deux paramètres. L'un des paramètres dépend de l'énergie résiduelle des nœuds, le second dépend du coût des communications intra-cluster [16]. Les CHs sont élus périodiquement en se basant sur l'énergie résiduelle et le coût de la communication intra-cluster des nœuds candidats [17]. L'envoi des données depuis un Cluster-Head vers la SB se fait en sauts multiples.

5.6-HEEP (*Hybrid Energy Efficiency Protocol*):proposé par Boubiche *et al.* en l'an 2011 dans [18], l'organisation des nœuds appartenant à la même grappe (cluster) sous forme d'une chaîne permettent d'améliorer et de réguler la dissipation d'énergie permettant de réduire la charge sur le cluster-head. En effet, les nœuds communiquent uniquement avec leurs proches voisins et non pas directement avec leur cluster-head, ce qui économise d'avantage l'énergie et offre une meilleure utilisation de la bande passante. L'agrégation des données au niveau de chaque nœud dans la chaîne réduit la quantité de données échangées entre les nœuds et leur cluster-head, ce qui a pour effet de préserver les réserves énergétiques de ces derniers.

La figure 2.4, montre comment les nœuds seront organisés à l'intérieur des clusters. Le nœud N_0 transmet ses données à son proche voisin N_1 qui à son tour agrège les données reçues avec les siennes et les transmet à son voisin jusqu'à atteindre le cluster-head qui les transmet directement à la station de base. Donc, dans cette nouvelle organisation (grappe à chaînes), tous les nœuds du cluster vont transmettre leurs données collectées à leurs cluster-heads respectifs en se reliant à travers la chaîne, tandis que chaque CH doit recevoir les données collectées par les nœuds de même cluster.

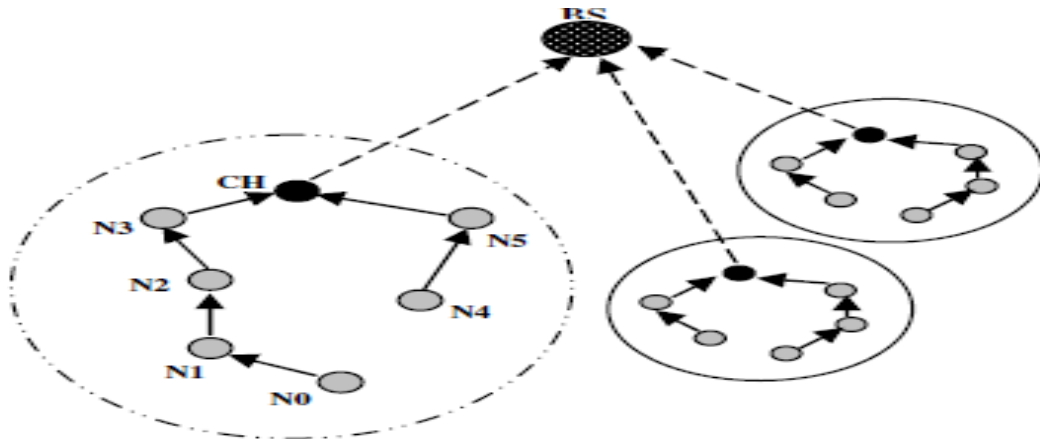


Figure 2.4 Architecture de communication du protocole HEED [21].

5.7-TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol): introduit dans [22] par A. Manjeshware *et al.*, le protocole TEEN est conçu pour les applications se basant sur le mode de communication événementiel (les applications dédiées pour détecter les changements soudains). L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique multi-niveaux où les nœuds les plus proches forment des clusters. TEEN est une hybridation du clustering hiérarchique et parmi les protocoles centrés-données. Il utilise la stratégie de LEACH pour la création des clusters. Après l'établissement des clusters, le CH diffuse aux membres de son groupe le seuil maximal et minimal. Les nœuds capteurs surveillent leurs environnements continuellement. Une fois que la valeur des données dépasse le seuil maximal, ou diminue le seuil minimal, le nœud transmet les données récoltées.

5.8-APTEEN (AdaPtive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) proposé dans [23] par A. Manjeshware *et al.*, est une réforme de TEEN dédiée à la fois aux applications se basant sur le mode de communication événementiel et à celles se basant

sur le mode de communication périodique. La formation des clusters est faite par la station de base puis des valeurs des attributs sont diffusées par les cluster-heads vers tous les nœuds du réseau. Une agrégation de données est aussi réalisée par les Cluster-Head dans le but de minimiser l'énergie.

6- Exemples de protocoles de routage dans les WSN

Protocole de routage	Type	QoS performance	Agrégation de données
SPIN	PLAT	-	✓
Directed diffusion	PLAT	-	✓
EAR	PLAT	-	-
CADR	PLAT	-	-
COUGAR	PLAT	-	✓
LEACH	Hierarchique	-	✓
PEGASIS	Hierarchique	-	✓
AQUIRE	PLAT	-	-
TEEN	Hierarchique	-	✓
MCF	PLAT	-	-
HEED	Hierarchique	-	-
MECN	Géographique	-	-
GAF	Géographique	-	-
TTDD	Hierarchique	-	-
GEAR	Géographique	-	-
Rumor	PLAT	-	✓
SPEED	Géographique	-	-
GBR	PLAT	-	✓
SAR	Géographique	?	-

Tableau 2.2 : Comparaison des Protocoles de Routage dans (RCSF)

7-Avantages et inconvénients des méthodes hiérarchiques :

Les méthodes hiérarchiques ont des avantages tels que :

- La réduction du temps de conception,
- la documentation complète de la conception,
- la lecture de l'arbre permet de déterminer le nombre optimal de classes.

Mais présentent aussi des inconvénients :

- La différence dans les hiérarchies.
- Coûteux en temps de calcul.
- Problèmes de disposition du circuit.
- Incapacité à bien évoluer.

8-Conclusion

Le routage de données est considéré comme le domaine le plus exploré parmi les domaines de recherche sur les réseaux de capteur. Il représente aussi un problème complexe car nous devons assurer la fiabilité de livraison de données, la performance du système et tout cela en consommant moins d'énergie.

Les protocoles de routage pour les RCSF sont nombreux avec un unique objectif : Assurer la délivrance des paquets collectés par les nœuds capteurs tout en parvenant à étendre la durée de vie du réseau.

Ce pendant, les pannes sont inévitables dans ce type de réseaux .Ces pannes peuvent avoir des conséquences catastrophiques.

CHAPITRE 3

Le protocole de routage hiérarchique LEACH

1-Introduction

Ces dernières années, les chercheurs se sont concentrés sur les réseaux de capteurs sans fil (WSN) en raison de leurs nombreuses applications. Ces réseaux sont constitués de nombreux petits nœuds capteurs équipés de petites batteries auto-rechargeables. Il est parfois possible de changer la source d'alimentation de la batterie du nœud, mais c'est souvent impossible lorsque ces nœuds capteurs sont situés dans des endroits hostiles ou non atteignables (exemple : au fond d'un océan, portés par des animaux ou dans des endroits inaccessibles). Ainsi, l'environnement dans lequel est placé le réseau peut jouer un rôle déterminant. L'augmentation de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil constitue un défi majeur pour les chercheurs. De nombreux protocoles WSN ont été proposés pour augmenter cette durée de vie, notamment le protocole hiérarchique (LEACH : Low Energy, Adaptive Clustering Hierarchy) qui est l'un des premiers protocoles à avoir été adopté. Plusieurs modifications y ont été apportées à ce protocole pour l'améliorer.

Dans ce chapitre, nous décrivons le protocole de routage LEACH, et nous allons présenter les différentes phases utilisées par ce dernier, leurs avantages, leurs inconvénients et leurs limitations ainsi que la radio pour l'analyse de l'énergie.

2-Définition

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de routage hiérarchique, employant un procédé de clustering qui divise le réseau en deux niveaux : les cluster-heads et les nœuds membres. Le protocole se déroule en rounds. Chaque round se compose de deux phases : construction et communication

3-Le protocole de routage hiérarchique

3-1 Définition de routage

Le routage est un processus qui permet de sélectionner le meilleur chemin dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. On distingue généralement deux entités : l'algorithme de routage et le protocole de routage. Dans les réseaux de capteurs, les différentes caractéristiques comme la densité importante des nœuds, leurs autonomies énergétiques limitées et la topologie qu'ils forment exigent des protocoles de

routage spécifiques. De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère indispensable. Ces protocoles doivent tenir compte de l'aspect fonctionnel de ces réseaux tout en optimisant les calculs nécessaires pour choisir le meilleur chemin [21].

3-2 le fonctionnement des Protocoles de routage hiérarchiques

La plupart des protocoles de routage utilisés dans les RCSF sont des protocoles hiérarchiques. On considère ces protocoles comme l'approche la plus bénéfique en matière d'efficacité énergétique, en particulier dans les réseaux de capteurs à grande échelle. Le routage hiérarchique permet de partitionner le réseau en sous ensemble pour faciliter sa gestion, ce qui permet une meilleure conservation de l'énergie. Le partitionnement du réseau permet de l'organiser de telle sorte que chaque sous ensemble de nœuds élise un super nœud appelé cluster-head. Ce dernier gère cet ensemble de nœuds et communique avec d'autres cluster-heads ou avec la base station directement [22].

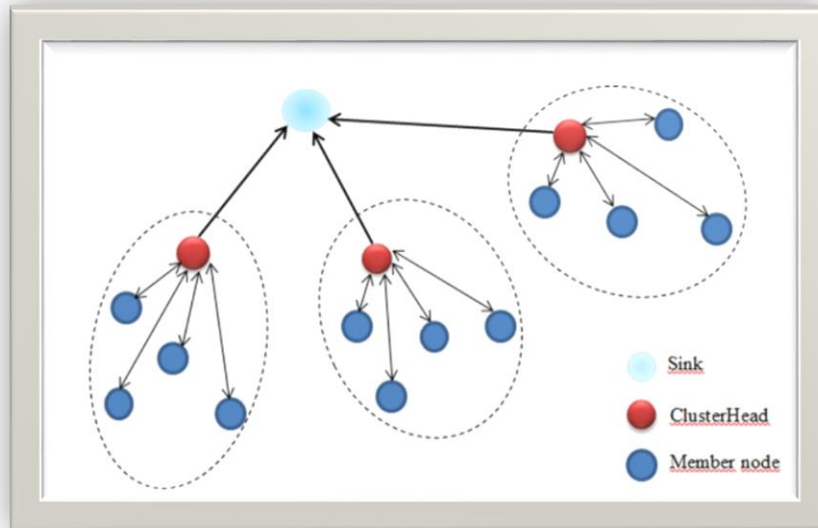


Figure.3.1 Exemple de routage hiérarchique

3-3 Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)**3-3.1 Description**

LEACH est considéré comme étant l'un des protocoles de routage hiérarchique les plus populaires. Ce protocole se base sur le regroupement dynamique des nœuds. C'est l'un des premiers protocoles hiérarchiques basé sur la notion de « cluster » ou grappe implémenté pour les RCSF qui partitionne ce dernier en groupes (clusters) comprenant deux niveaux : les chefs de groupe (cluster-heads) et les nœuds membres. Il est également considéré comme la base des autres protocoles de routage hiérarchique. Dans chaque cluster, le nœud Cluster-Head (CH) a des privilèges supplémentaires : il est le responsable de la création du cluster et de la manipulation des données à transmettre en utilisant le TDMA (Time Division Multiple Access) et il envoie ces données agrégées à partir des nœuds à la station de base où elles sont nécessaires en utilisant un CDMA (Code Division Multiple Access). Les nœuds restants sont des membres du cluster [23].

3.3.2 L'objectif du protocole LEACH

Le protocole de routage hiérarchique LEACH vise principalement à réduire de manière efficace la consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication au sein d'un cluster, tout en effectuant l'agrégation et la fusion des données pour réduire le nombre de messages transmis à la destination. En général, la création des clusters repose sur la capacité d'énergie des capteurs et sur les capteurs situés à proximité du centre du cluster [24].

3.3.3 Le principe de base du protocole LEACH

LEACH repose sur la division du réseau en deux niveaux : les cluster-heads (CHs) ou les chefs de groupe et les nœuds membres. Le CH a pour mission de recueillir les données enregistrées par ses membres et de les transmettre à la station de base, ainsi qu'aux nœuds membres en général. La rotation randomisée est utilisée dans le protocole LEACH pour choisir les CHs afin d'assurer une répartition uniforme de la charge énergétique entre tous les nœuds du réseau. Elle se déroule en rounds. Les deux phases de chaque round sont la configuration et la transmission [25].

3.3.4. Le Rounds dans le protocole LEACH

Le protocole LEACH prend pour hypothèse l'égalité des énergies résiduelles des capteurs lors du démarrage de fonctionnement du réseau. La vie du réseau est alors segmentée en rounds caractérisés par un choix du CH. Chaque round est constitué de deux phases : **la phase set-up** qui est une phase d'initialisation et la phase **steady-state** qui concerne la phase de transmission.

4- Les différentes phases du protocole LEACH

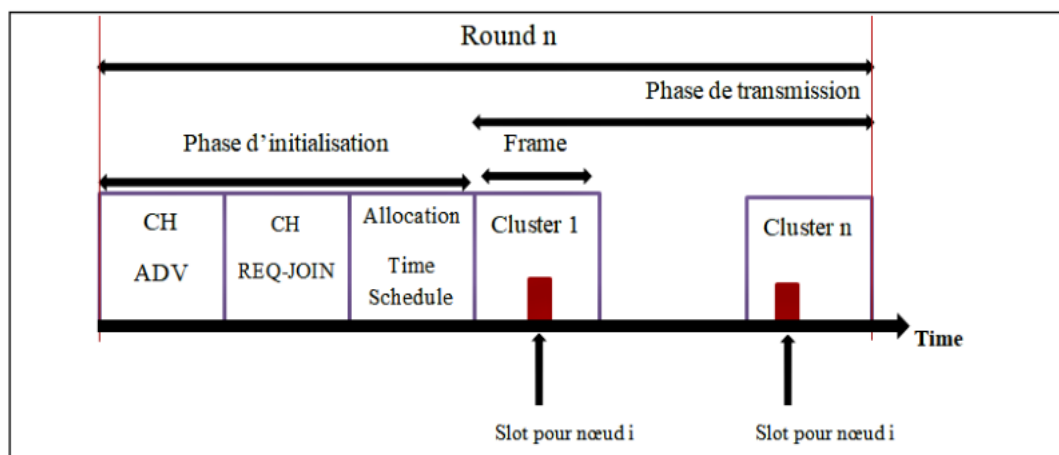


Figure 3.2 : Les différentes phases utilisées par le protocole LEACH

4.1 Phase d'initialisation

Au début de chaque round, chaque nœud :

- Sélectionne un nombre aléatoire x entre 0 et 1 ;
- Calcule une valeur du seuil où donnée dans l'équation (1).
- Si cette valeur est inférieure à la valeur du seuil, ce nœud est élu lui-même comme CH. Toutefois, avant qu'un nœud puisse s'annoncer comme un CH parmi les autres, il vérifie s'il a reçu une annonce d'un autre CH, il décidera alors de quitter son rôle en tant que CH au cours de ce round et d'adhérer à un quelconque des clusters déjà formés. Un nœud envoie un message de la jointure à un des clusters formés dans lequel l'énergie minimale caractérise la communication avec le CH (i.e. le CH le plus proche). Cet algorithme assure également qu'un nœud puisse devenir un CH uniquement une fois dans un $1/p$ rounds.

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

Lors de la phase de configuration « set-up phase », les nœuds cluster-head sont élus et les clusters sont formés. L'élection des cluster-heads se déroule comme suit :

- chaque nœud choisit un nombre de manière aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à une valeur $T(n)$, le nœud devient cluster-head. La valeur de $T(n)$ est définie comme suit:

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

Sinon 0

Avec :

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

n : numéro d'un nœud donné.

r : est le round courant.

G : représente l'ensemble des nœuds qui n'ont pas encore été élus cluster-head sur les derniers rounds.

4.3 phase de transmission

En utilisant le Schedule TDMA, Chaque nœud membre (non-CH) dans le cluster transmet les données collectées à son CH. Et après le CH effectuer une opération

d'agrégation puis une autre opération de compression de toutes ces données réceptionnées

afin de l'envoyer à la station de base (sink) .

Après un intervalle de temps donné, une rotation randomisée du rôle du CH est conduite de sorte que la dissipation uniforme d'énergie dans le réseau de capteurs soit obtenue. En outre, LEACH utilise la technique de multiplexage CDMA pour que les CH

les envoient les données à la station de base, où la communication inter-cluster aura lieu. La

communication peut être directe (un seul saut) ou indirecte (multi-sauts). Un nouveau round aura lieu après la fin de cette phase, ce processus est répété jusqu'à ce que tous les nœuds du réseau soient élus comme CH, une seule fois, tout au long des rounds précédents. Dans ce cas, le round est réinitialisé à 0.

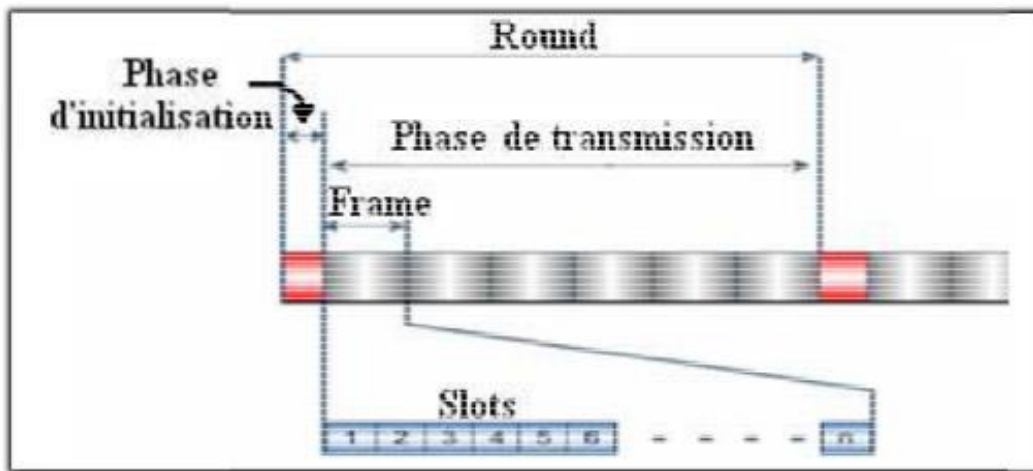


Figure 3.3 : La répartition du temps utilisée dans la phase de transmission

5- Architecture de communication de LEACH

L'architecture de communication de LEACH consiste, de façon similaire aux réseaux cellulaires, à former des cellules basées sur l'amplitude du signal, et utiliser les têtes de cellules comme routeurs vers le nœud puits. Ces cellules sont appelées clusters, quant aux têtes, Les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster, en fonction de l'état de sa batterie. Puis, ils sont utilisés comme relais pour atteindre le puits suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds de réseau [26]. Un nœud capteur décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus. A la formation des groupes. Comme montre la figure 3.4, tous les nœuds ordinaires transmettent leurs données à leur CH qui les agrègent et transmettent, à leur tour, à la BS selon une communication unicast (à un seul saut).

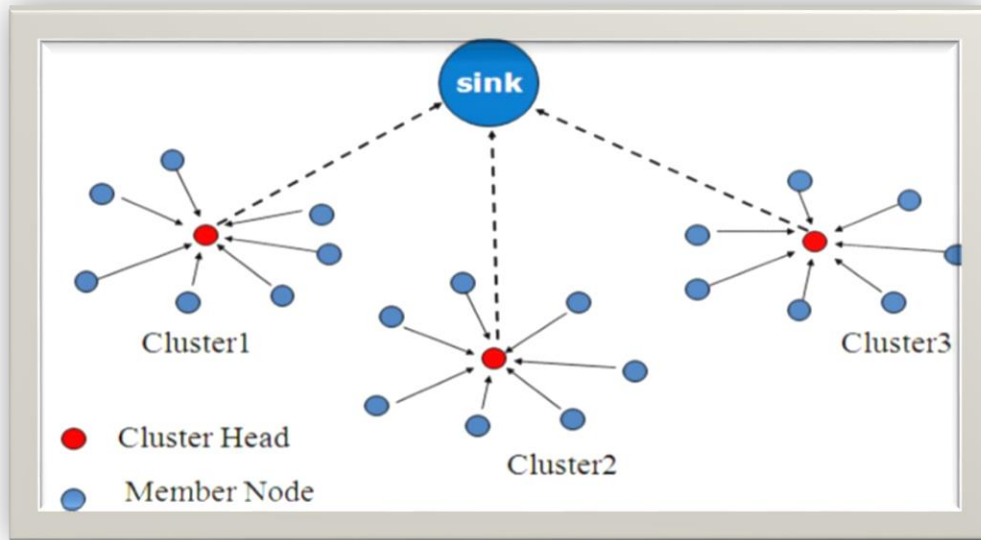
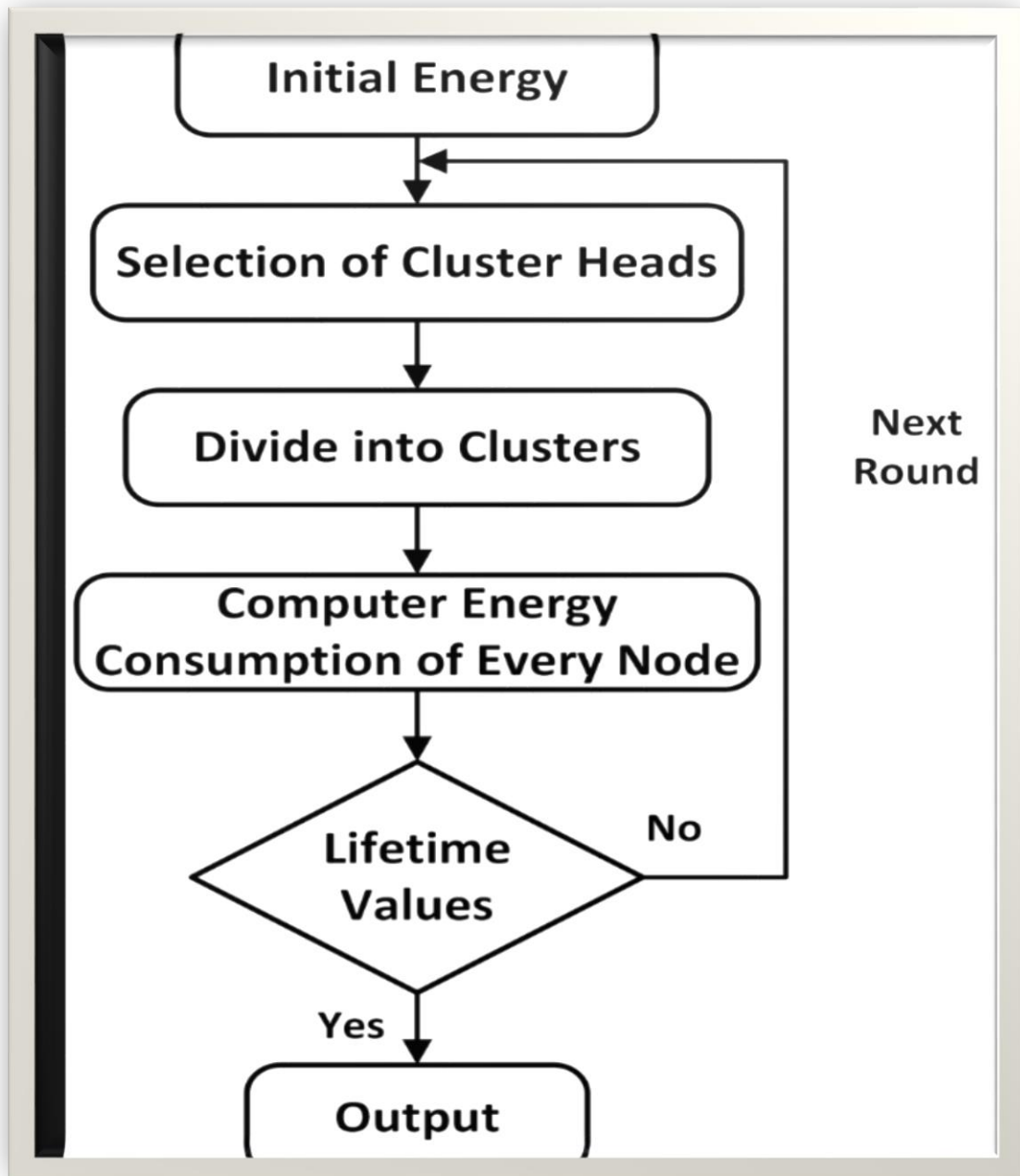


Figure3.4 Architecture communication le protocole Leach

Les CHs ont pour mission d'assurer les fonctions les plus coûteuses en énergie, à savoir la communication avec le nœud puits qui est supposé éloigné, ainsi que tous les traitements de données (agrégation, fusion et transmission de données) afin de réduire la quantité des données transmises. Ce dispositif permet d'économiser l'énergie puisque les transmissions sont uniquement assurées par les CHs plutôt que par tous les nœuds du réseau. Par conséquent, LEACH réalise une réduction significative de la dissipation d'énergie [27].

6-Algorithmme pour le protocole LEACH

**Figure 3.5** :Algorithme pour le protocole LEACH

7-Les avantages et les inconvénients et Limitations de protocole LEACH**A. Avantages de LEACH**

LEACH est un protocole de routage distribué complet. Il ne nécessite donc pas d'informations globales. Ses principaux avantages sont les suivants :

1. Le concept de clustering utilisé par le protocole LEACH impose moins de communication entre les nœuds de capteurs et la BS, ce qui augmente la durée de vie du réseau.
2. CH réduit les données corrélées localement en appliquant une technique d'agrégation de données qui réduit la quantité significative de consommation d'énergie.
3. Le protocole LEACH offre à chaque nœud capteur une chance égale de devenir CH au moins une fois et de devenir membre plusieurs fois au cours de sa vie. Cette rotation aléatoire du CH améliore la durée de vie du réseau.
4. Protocole auto-organisateur basé sur le groupement adaptatif .
5. Faible énergie pour l'accès au média Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CHs afin d'optimiser l'utilisation du média de communication en la faisant gérer localement par un CH pour minimiser les interférences et les collisions..
6. Lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il éteint sa radio pour conserver son énergie.
7. L'utilisation des techniques TDMA/CDMA permet d'avoir une hiérarchie et de réaliser des clusterings sur plusieurs niveaux

B. Inconvénients de LEACH

Cependant, LEACH présente certains inconvénients, qui sont les suivants :

1. À chaque tour, le CH est choisi aléatoirement et la probabilité de devenir CH est la même pour chaque nœud capteur. Après quelques tours, la probabilité que les nœuds capteurs à haute et basse énergie deviennent CH est la même. Si le nœud capteur à faible énergie est choisi comme CH, il meurt rapidement. Par conséquent, la robustesse du réseau est affectée et sa durée de vie se dégrade.
2. LEACH utilise une communication à saut unique entre le CH et la BS. Au-delà d'une certaine distance, les CH éloignés de la BS consomment plus d'énergie que ceux proches. Cela entraîne une dissipation d'énergie inégale, ce qui réduit la durée de vie du réseau de capteurs
3. La possibilité de ne pas avoir des CH durant un round.
4. Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.
5. Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à
6. ceux qui sont proches de la station ;
7. 'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication
8. multi-sauts diminue l'énergie des nœuds
9. La rotation des CH n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CH .

C .Limitations de LEACH

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

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

8- Modèle radio pour l'analyse de l'énergie : modèle simple

Nous considérons un modèle simple pour décrire l'énergie dissipée par les composants radio (matériel RF). Le capteur consomme de l'énergie pour faire fonctionner l'électronique, tandis que le récepteur radio dissipe de l'énergie supplémentaire pour amplifier le signal et transmettre les données sur de plus longues distances, comme illustré dans la **figure (3.6)**

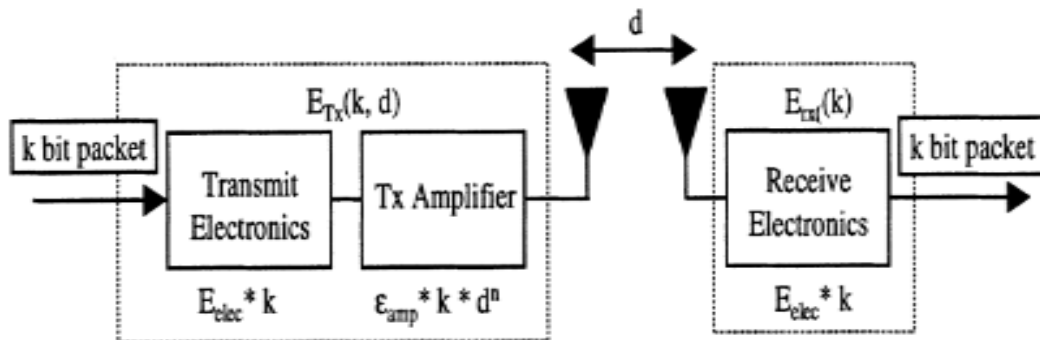


Figure (3.6) : La transmission et la réception dans les capteurs

Le routage dans ces réseaux utilise deux types de modèles de canaux comme méthode pour représenter la perte d'énergie :

➤ Perte d'énergie en espace libre :

nécessite une énergie d'amplification de $\epsilon_{fs} \cdot d^2$,

où ϵ_{fs} est l'énergie d'amplification dans un espace libre,

et d est la distance entre l'émetteur et le récepteur.

➤ Perte d'énergie dans les cas de multi-trajets (multi-path fading) :

nécessite une énergie d'amplification de $\epsilon_{mp} \cdot d^4$,

où ϵ_{mp} est l'énergie d'amplification dans le modèle à trajets

multiples.

On peut utiliser un contrôleur de puissance pour choisir l'un des deux modèles de canaux, en configurant correctement l'amplificateur de puissance comme suit :

➤ Si la distance entre l'émetteur et le récepteur est inférieure au seuil d_0 , le modèle d'espace libre est utilisé.

➤ Sinon, le modèle de multi-trajets est utilisé.

L'énergie consommée par la radio pour un message composé de k bits et une distance d est la suivante :

✚ **Énergie de transmission :**

La formule de l'énergie de transmission est donnée par :

$$E_{TX}(k, d) = k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2 \dots\dots\dots (1)$$

Ceci est la forme simplifiée de l'énergie de transmission pour les courtes distances, tandis que la forme générale est :

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2, & \text{si } d < d_0 \\ k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{mp} \cdot d^4, & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

➤ **Routage basé sur la localisation (Location-base d routing) :**

Les nœuds s'appuient sur des informations de localisation afin de transmettre les données à travers le réseau en direction du nœud de destination.

➤ **Routage basé sur la qualité de service (QoS-base d routing) :**

Les problématiques de qualité de service (QoS) prennent en compte des critères tels que, par exemple, le délai de transmission entre les nœuds dans un réseau de capteurs sans fil.

Où k est le nombre de bits du message, d est la distance de transmission, E_{elec} est l'énergie électronique, et E_{mp} est l'énergie d'amplification.

✚ Énergie de réception

Les équipements du message consomment de l'énergie radioélectrique des ondes comme suit :

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{elec} \dots\dots\dots (3)$$

E_{elec} représente l'énergie des circuits électroniques, et elle dépend de plusieurs facteurs tels que l'encodage numérique, la modulation, le filtrage et l'amplification du signal.

En revanche, l'amplificateur de puissance (ϵ_{mpd} ou ϵ_{fsd}) dépend de la distance par rapport à l'émetteur ainsi que du taux d'erreur de codage acceptable

➤ L'énergie consommée dans le chef de cluster"

Partie des nœuds, le **chef de cluster** consomme de l'énergie pour la réception du signal, la transmission du signal, ainsi que pour collecter l'énergie reçue et la transmettre à la station de base.

Nous considérons un modèle à décroissance multiple pour suivre l'énergie dissipée dans le trajet d .

Étant donné que la station de base est éloignée des nœuds, l'énergie dissipée dans l'envoi du message est calculée comme

$$E_{CH} = k E_{elec} (kN - 1) + k E_{DA} (kN) + k \epsilon_{mp} d_{to BS} \dots\dots\dots (4)$$

Où $d_{to BS}$ est la distance entre le **chef de cluster** et la station de base, et E_{DA} représente l'énergie de collecte des données et N_c le nombre des nœud.

➤ **l'énergie consommée dans les nœuds non verticaux**

Chaque nœud non vertical doit transmettre ses données uniquement une fois à chaque cadre au chef de cluster. Étant donné que la distance entre le nœud et le chef de cluster est faible, l'énergie dissipée utilise un modèle de perte d'énergie dans l'espace libre. Par conséquent, l'énergie utilisée dans ces nœuds est calculée comme suit :

$$E_{non-CH} = kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d_{toCH}^2 \quad (5)$$

Où d_{toCH} est la distance entre le nœud et le **chef de cluster**

9 -Proposition d'optimisation le Protocol LEACH

Dans ce travail, nous étudions un réseau de capteurs homogènes en nous concentrant sur l'amélioration du protocole LEACH, reconnu pour son efficacité et ses bonnes performances dans ce type de réseau. L'objectif de cette amélioration est de rendre le protocole plus adapté à la distance entre la station de base et la zone de déploiement, ce qui permet de réduire davantage la consommation d'énergie, notamment lorsque cette distance est importante.

Le protocole LEACH amélioré repose sur un modèle mathématique permettant d'estimer le niveau moyen d'énergie restante dans le réseau, afin d'évaluer l'efficacité de chaque nœud lors de la sélection des chefs de cluster (Cluster Heads) à chaque cycle. Contrairement à la version originale de LEACH, cette version améliorée tient compte à la fois de l'énergie résiduelle des nœuds et de la distance entre la station de base et le champ de travail.

Les résultats de simulation montreront que le protocole amélioré offre de meilleures performances que LEACH original, en termes de :

- réduction de la consommation énergétique,
- augmentation du nombre de nœuds vivants au cours du temps,
- et amélioration du nombre de paquets transmis avec succès vers la station de base.

10 -Conclusion

A travers ce chapitre, on a décrit la notion du routage hiérarchique, qui vise à rendre les protocoles plus adaptés à l'évolutivité (l'extension à grande échelle), tout en maintenant une consommation d'énergie économique. Cette approche permet de couvrir une zone de détection plus large de manière efficace.

Dans ce contexte, nous avons étudié le protocole LEACH, considéré comme l'un des premiers et des plus célèbres protocoles de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF).

Le protocole LEACH repose sur la division du réseau en clusters, avec la désignation périodique et aléatoire de chefs de cluster (Cluster Heads), afin de répartir équitablement la charge énergétique entre les nœuds. Chaque chef de cluster est chargé de regrouper les données de ses membres et de les transmettre directement à la station de base (Base Station), ce qui permet de réduire le nombre de transmissions longues distance, et donc de minimiser la consommation énergétique globale.

Malgré sa simplicité et son efficacité énergétique, LEACH présente certaines limitations, notamment sa dépendance à un choix aléatoire des chefs de clusters, ce qui peut entraîner un déséquilibre énergétique, surtout dans les réseaux de grande taille ou à haute densité.

CHAPITRE 4

Simulation et Evaluation

1-Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à l'implémentation de notre approche. Nous nous proposons, d'abord, de mettre en œuvre le protocole LEACH puis d'en analyser les résultats, notamment en ce qui concerne la consommation d'énergie et les mécanismes permettant de la préserver plus longtemps, dans le but de prolonger la durée de vie du réseau. Ensuite, nous allons procéder à une amélioration partielle du protocole tout en conservant sa structure de base, afin d'obtenir de meilleurs résultats. L'objectif principal restant, toujours, d'optimiser la consommation énergétique sur une plus longue période. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel **MATLAB 2018**, qui s'est révélé très utile. Enfin, nous allons comparer les résultats obtenus avec ceux du protocole.

2- Définition du Problème

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont confrontés à des défis énergétiques inhérents à leur nature. Les nœuds capteurs, qui constituent l'épine dorsale de ces réseaux, sont généralement de petite taille, peu coûteux et déployés en grand nombre, souvent dans des environnements où l'intervention humaine pour la maintenance, notamment le remplacement des batteries, est difficile, voire impossible. Cette contrainte énergétique limite directement la durée de vie opérationnelle du réseau, ce qui peut compromettre la mission pour laquelle il a été déployé. La mort prématurée d'un certain nombre de nœuds, en particulier ceux occupant des positions stratégiques, peut entraîner une perte de connectivité, une dégradation de la couverture de détection et, finalement, une défaillance de l'ensemble du réseau.

3-Les objectifs du travail

Ce travail vise à implémenter et optimiser le protocole LEACH pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil, avec un accent particulier sur l'optimisation de la consommation d'énergie et l'allongement de la durée de vie du réseau. Pour cela, les objectifs spécifiques sont :

1. Implémenter et simuler le protocole LEACH dans un environnement MATLAB, incluant le déploiement des nœuds, la formation des clusters et la sélection des chefs de cluster.
2. Analyser le comportement du protocole à travers les rounds de simulation, en observant la formation des clusters et la consommation énergétique.
3. Évaluer la performance énergétique en mesurant l'énergie résiduelle et la consommation des nœuds.

4. Analyser le débit de données pour mesurer l'efficacité de la transmission vers la station de base.
5. Interpréter les résultats de simulation afin d'identifier les points forts et les limites du protocole

4-Le Protocole Proposé (ou Étudié)

Le protocole étudié dans ce travail est une implémentation du protocole LEACH algorithme de routage hiérarchique bien connu et largement utilisé comme référence dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) pour son approche visant à économiser l'énergie. L'implémentation spécifique analysée ici est basée sur le code MATLAB fourni par l'utilisateur, qui simule le déploiement d'un réseau de capteurs, l'exécution du protocole LEACH sur plusieurs tours (rounds), et la collecte de statistiques de performance.

4.1 Principes de Fonctionnement de LEACH

LEACH est un protocole de routage hiérarchique, adaptatif et auto-organisé, destiné aux réseaux de capteurs sans fil. Il fonctionne en rounds (tours), chacun étant composé de deux phases principales :

1. Phase de configuration (Setup Phase):

Les nœuds s'organisent en clusters. Chacun décide de manière autonome s'il devient chef de cluster (CH), selon un modèle probabiliste basé sur un pourcentage cible et l'historique des rôles joués. Les nœuds non-CH rejoignent ensuite le CH le plus proche selon la force du signal. Le CH attribue ensuite des slots TDMA pour éviter les collisions de transmission.

2. Phase de transmission des données (Steady-StatePhase):

Les membres envoient leurs données au CH pendant leur créneau TDMA. Le CH agrège les données pour réduire la redondance, puis les transmet à la station de base (BS).

Un élément clé de LEACH est la rotation périodique du rôle de CH entre les nœuds afin de répartir la consommation énergétique, et ainsi prolonger la durée de vie du réseau.

4-2 Architecture du Protocole LEACH

L'architecture de LEACH est hiérarchique et se compose de trois entités principales :

1. Nœuds capteurs :
Ils collectent les données de l'environnement. La plupart sont de simples nœuds membres, avec des capacités limitées en énergie et en traitement.
2. Chefs de cluster (CH) :
Ce sont des nœuds capteurs élus pour coordonner un cluster. Ils reçoivent les données des nœuds membres, les agrègent, puis les envoient à la station de base. Leur rôle est plus énergivore.
3. Station de base (BS) :
C'est le centre de collecte des données du réseau. Elle est généralement riche en ressources et située à distance des nœuds capteurs.

Dans la simulation sous MATLAB, les nœuds sont déployés aléatoirement dans une zone donnée, avec une station de base fixe, placée au centre ou à une position spécifique.

5-Initialisation du Réseau et des Paramètres

5-1 Modèle Énergétique

Le modèle de consommation d'énergie radio utilisé dans le code est un modèle classique de premier ordre :

- **Pour transmettre un paquet de k bits sur une distance d :**
 - $E_{TX}(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp}(k, d)$
 - E_{elec} = énergie consommée par l'électronique de transmission
 - $E_{amp}(k, d) = E_{fs} * k * d^2$ si $d \leq d_0$
 - $E_{amp}(k, d) = E_{amp} * k * d^4$ si $d > d_0$
- **Pour recevoir un paquet de k bits :**
 - $E_{RX}(k) = E_{elec} * k$ (énergie consommée par l'électronique de réception)
- **Pour l'agrégation de données :**
 - $E_{DA}(k) = EDA * k$ (énergie consommée pour agréger k bits)

6-Environnement de programmation

❖ Pour le développement de notre simulation, nous avons utilisé un micro-ordinateur portable ayant les caractéristiques suivantes :

- Processeur intel(R) core(TM) i5-6300U CPU @ 2.40GHz , RAM 8.00 GO,
Card Graphics 128 MB, System 64:bit,Stokage:256.

- Système d'exploitation Microsoft Windows 10

❖ Pour la phase d'installation Nous avons adopté Le logiciel **MATLABa (9.4.0.813654)**

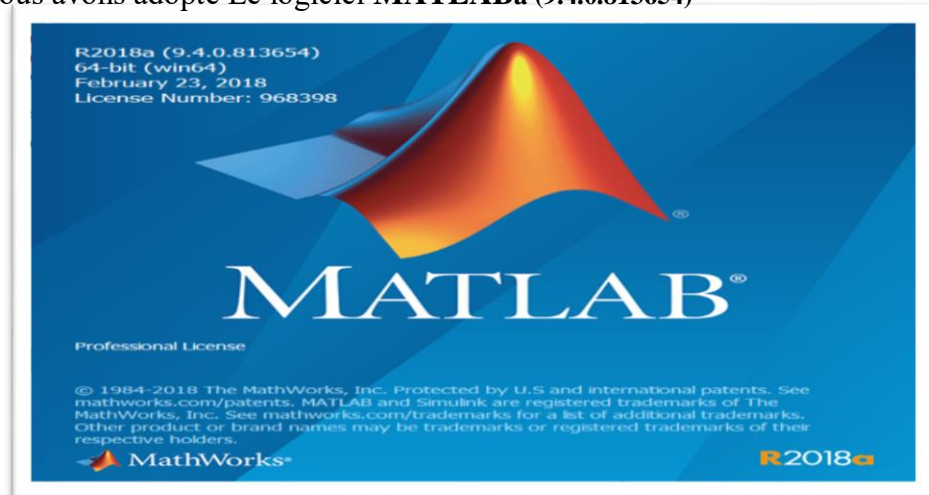


Figure 4.1 : Matlab R2018a

❖ Informations générales

❖ Nom complet : **MATLAB R2018a**

❖ Version : **9.4.0.813654**

❖ Date de sortie : **Mars 2018**

❖ Éditeur : **MathWorks**

❖ Langage utilisé : **Langage MATLAB (proche du C avec des fonctionnalités scientifiques avancées).**

7-Les paramètres de simulation

Les paramètres choisis pour la simulation sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Surface du champ (x x y)	300m x 300m
Nombre de nœuds (n)	200
Énergie initiale (Eo)	0.5 J
Seuil de distance (do)	calculé automatiquement
Facteurs énergétiques	ETX = ERX = 50 nJ/bit
Modèles de propagation	Efs = 10 pJ/bit/m ² ; Emp = 0.0013 pJ/bit/m ⁴
Taille des paquets (k)	4000 bits
Rounds de simulation	1000
Position du Sink	(100, 75)
Nombre maximal de tours (rmax)	rmax=1000

Tableau 4.1 : Paramètres de simulation

L'optimisation apportée au protocole LEACH concerne principalement la formule de sélection des Cluster Heads (CH), ajustée selon l'énergie résiduelle des nœuds et leur distance par rapport au seuil do.

8- Résultats de simulation :

Les résultats ont été analysés selon plusieurs métriques importantes :

8-1 déploiements des nœuds de capteur

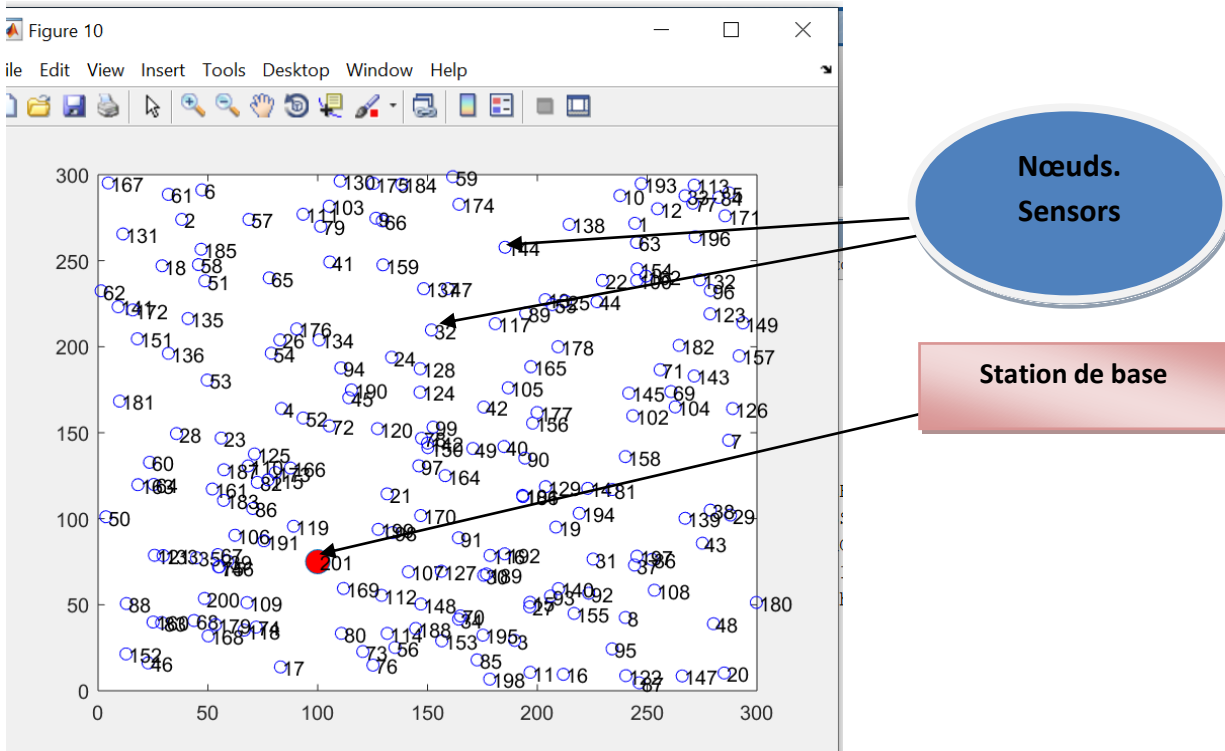


Figure 4-2 Topologie Initiale du Réseau

C'est une visualisation de la topologie initiale de la répartition des nœuds dans la zone du réseau avant le début de la simulation. Elle montre :

- Les nœuds capteurs (sensors) représentés par des cercles bleus .
- Le sink (la station de base) représenté par un cercle rouge .
- Les identifiants (IDs) de chaque nœud affichés à côté des points.

Utilité de la figure :

- Vérifier la distribution aléatoire des capteurs dans la zone (300m × 300m).
- Confirmer la position du sink, ici à (100, 75).
- Observer s'il y a des zones plus denses ou zones vides.
- Permet de mieux comprendre le comportement du protocole selon la répartition physique des nœuds.

Pourquoi elle est importante ?

La topologie du réseau influence fortement :

- La consommation énergétique (selon la distance entre les nœuds et les CH ou le sink).
- La formation des clusters (les nœuds proches se regroupent plus efficacement).
- La durée de vie du réseau, surtout si certains nœuds sont très éloignés du sink

8-2 Simulation Dynamique

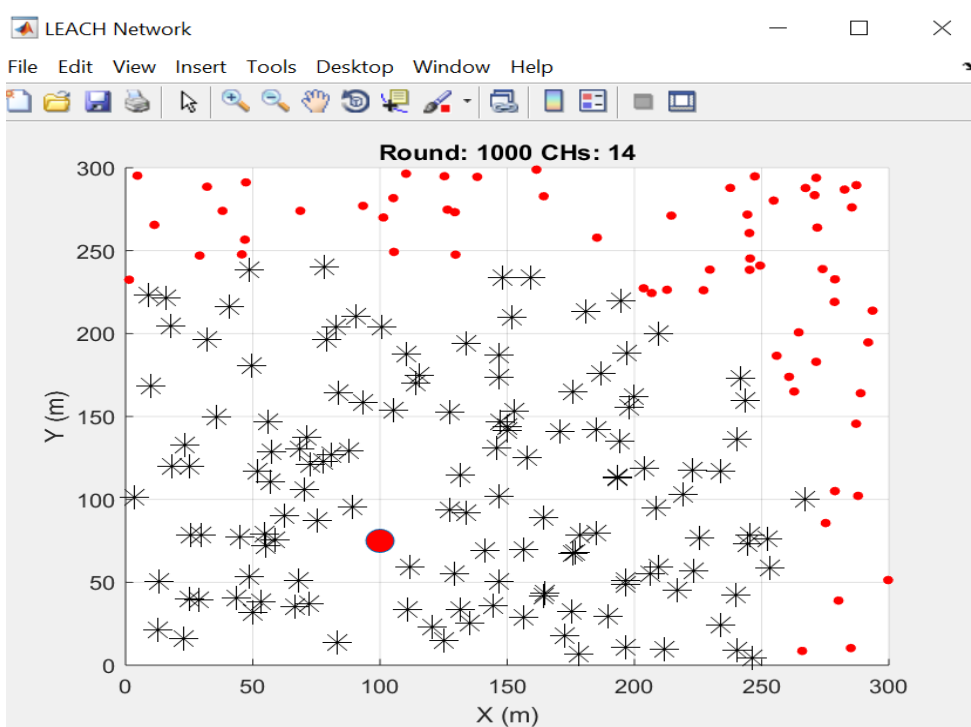


Figure 4-3 Simulation Dynamique du Réseau (LEACH en Action)

La Figure 1 est utilisée pour visualiser dynamiquement l'état du réseau tous les 10 rounds (tours de simulation). Elle montre :

- Les nœuds normaux (N) encore vivants (avec énergie > 0).
- Les Cluster Heads (CH) actuels de la ronde, affichés avec des étoiles noires ('*').
- Les nœuds morts, représentés par des points rouges .
- Le sink (station de base) est visible comme un gros point rouge.

Quand est-elle mise à jour ?

Elle est actualisée tous les 10 rounds grâce à la condition :Matlab

```
if(mod(r,10)==0)
```

Cela permet de voir l'évolution du réseau au fil du temps, en observant :

- La disparition progressive des nœuds (à cause de la décharge énergétique).
 - La sélection des CHs à chaque tour.
 - La répartition des nœuds actifs vs morts.
-

Pourquoi elle est importante ?

Cette figure permet de :

- Visualiser en temps réel le comportement du protocole LEACH.
- Analyser si les CHs sont bien répartis géographiquement.
- Vérifier la résilience du réseau (combien de temps il reste fonctionnel).
- Mieux comprendre comment les nœuds meurent progressivement.

8.3 Durée de vie du réseau :

La figure ci-dessous montre le nombre de nœuds vivants au fil des rounds.

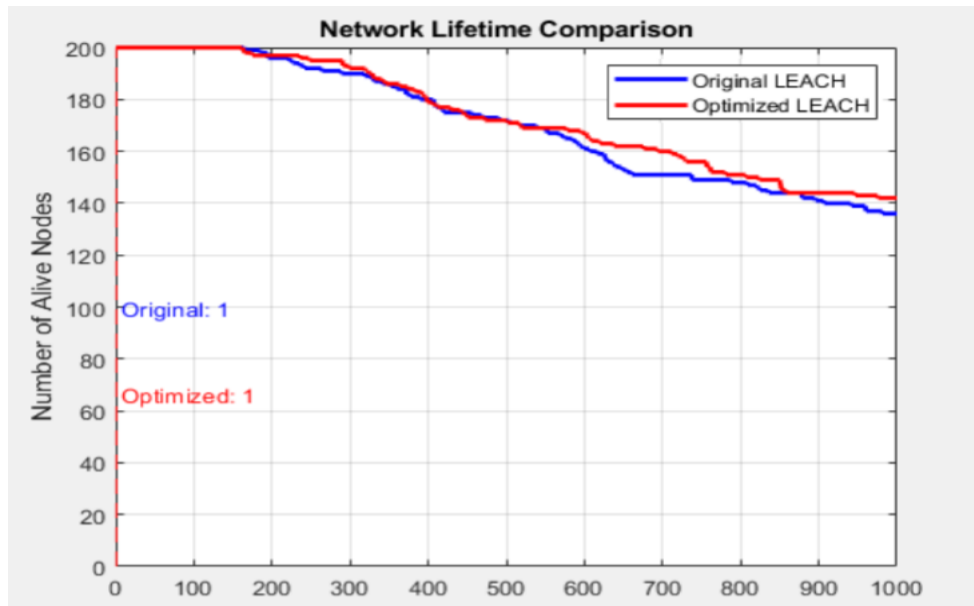


Figure 4.4 : Paramètres de simulation

L'optimisation apporte une amélioration visible en retardant le premier décès de nœud ainsi qu'en maintenant le réseau actif plus longtemps.

8.4 Énergie résiduelle :

La consommation d'énergie cumulée est comparée entre les deux versions dans la figure suivante :

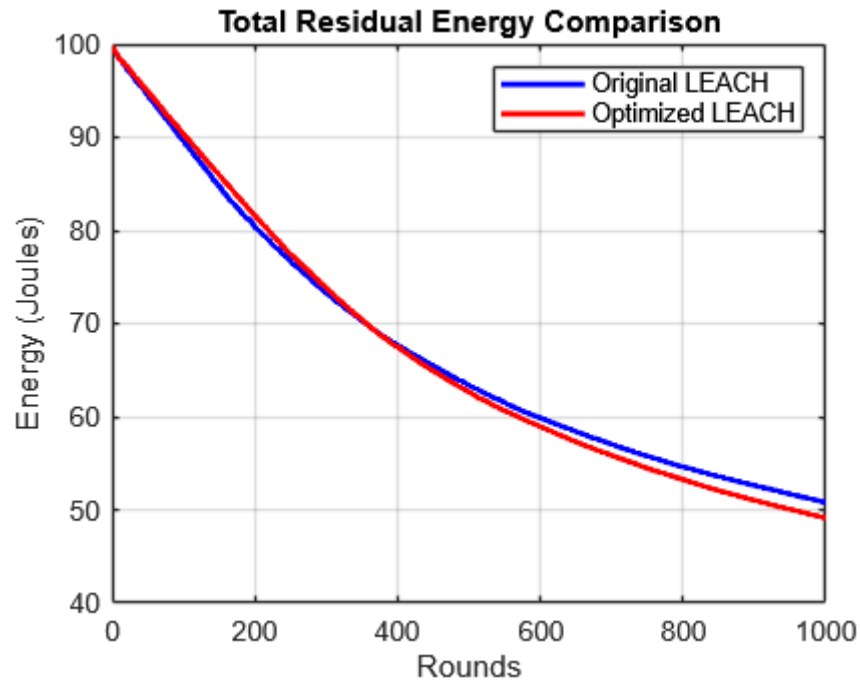


Figure 4.5 : Énergie résiduelle

Le protocole optimisé conserve davantage d'énergie au fil des rounds, ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

8.5 Débit global (Throughput) :

Le nombre total de paquets envoyés au cluster head ou à la station de base est représenté dans la figure ci-dessous :

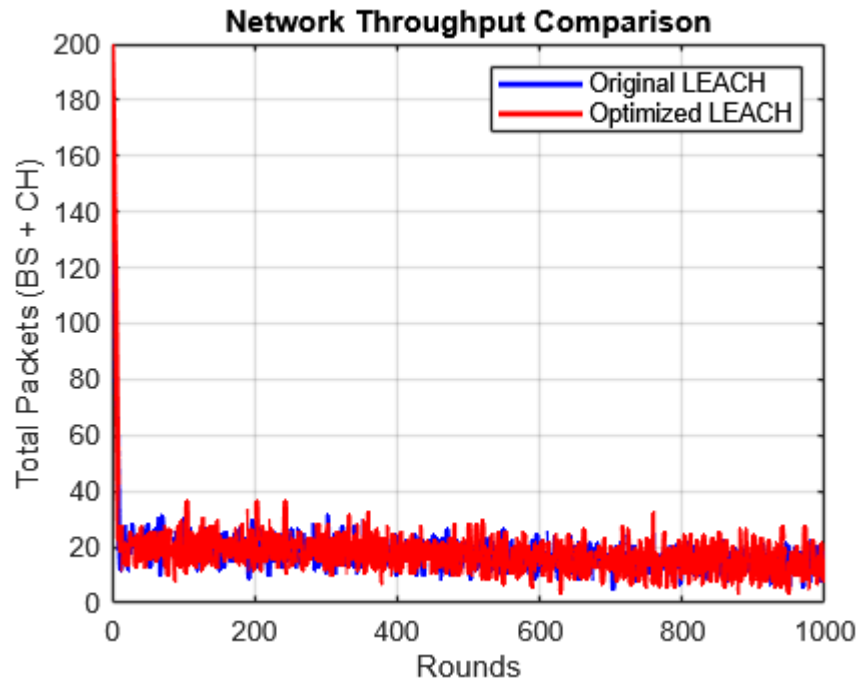


Figure 4.6 : Débit global (Throughput)

Le débit est légèrement supérieur pour la version optimisée, indiquant une meilleure utilisation du réseau pour la transmission des données.

8.6 Nombre de Cluster Heads par round :

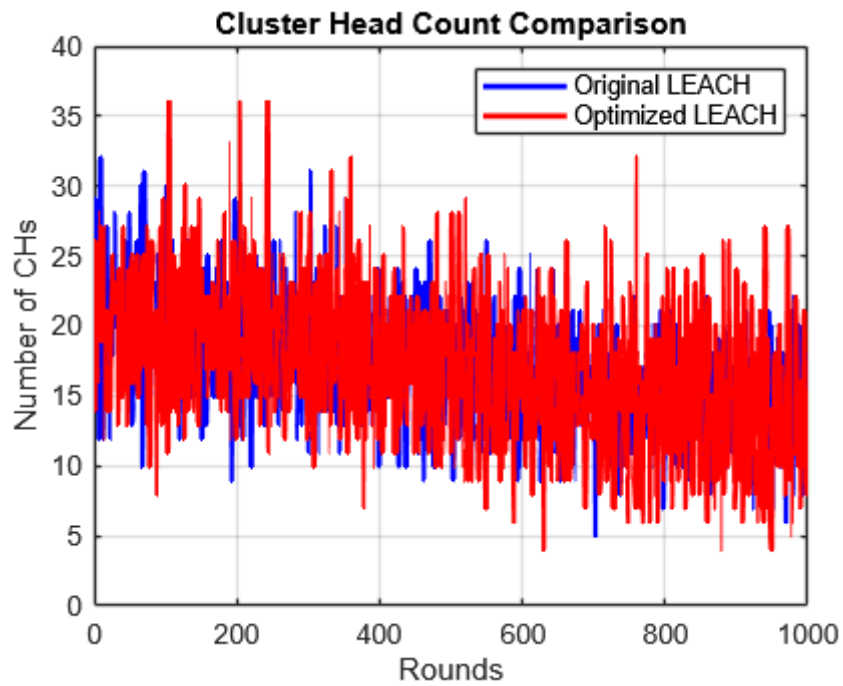


Figure 4.7 : Nombre de Cluster Heads par round

La régularité et la répartition des CH sont mieux contrôlées dans la version optimisée, réduisant ainsi les gaspillages énergétiques.

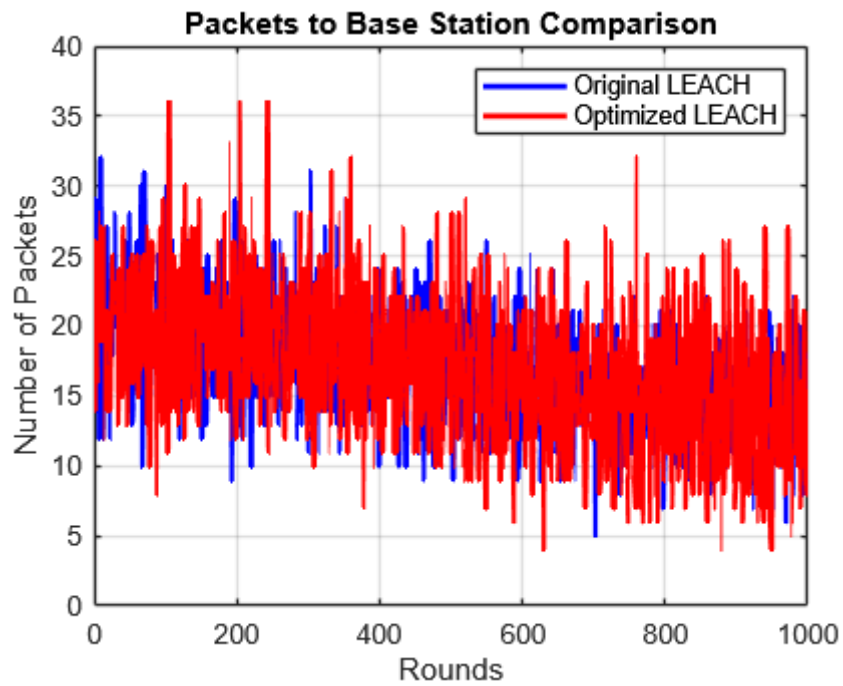
8.7 Nombre de paquets envoyés à la station de base :

Figure 4.8 : Nombre de paquets envoyés à la station de base

La version optimisée parvient à envoyer davantage de paquets à la station de base.

8.8 Taux de consommation énergétique par round :

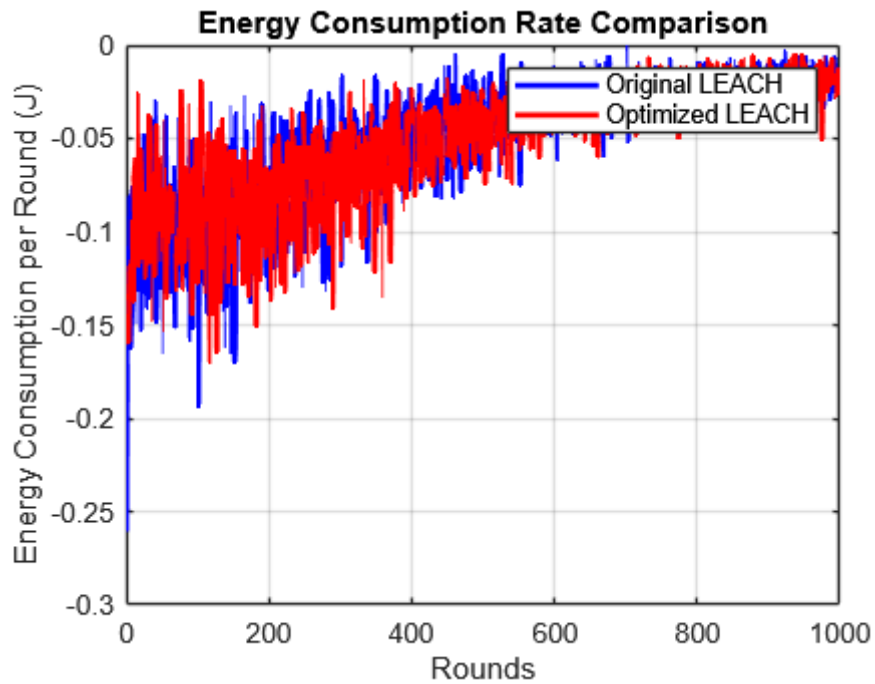


Figure 4.9 : Nombre de paquets envoyés à la station de base

Cette dernière figure montre que la version optimisée assure une consommation plus progressive et régulière, sans pics importants.

9- Conclusion

Les résultats de simulation montrent que l'optimisation du protocole LEACH, basée sur l'énergie résiduelle moyenne et la distance seuil, améliore plusieurs aspects du comportement du réseau :

- Prolongation de la **durée de vie du réseau**
- Amélioration du **débit global**
- Meilleure **gestion énergétique**
- Répartition plus équilibrée des **Cluster Heads**

Ces améliorations font de cette version optimisée un choix pertinent pour les déploiements réels nécessitant une efficacité énergétique accrue et une fiabilité dans la collecte de données.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons abordé le sujet Etude et mise en œuvre d'un protocole de routage hiérarchique dans les de Capteurs sans fil

L'objectif principal de notre mémoire était de concevoir et de développer un algorithme principal de Protocol Leach permettant de gérer efficacement, garantissant ainsi une gestion simplifiée et des résultats fiables. Grâce à ce projet, nous avons pu renforcer nos connaissances et nos compétences en matière de résolution de problèmes liés à l'utilisation des outils informatiques, notamment l'utilisation de la programmation d'interfaces graphiques, MATLAB VERSION 2018 comme un outil de développement dans la réalisation de notre application.

Pour les futurs travaux et perspectives, plusieurs améliorations peuvent être envisagées pour le développement et l'évolution de l'application en question.

Bibliographie

- [1] Sharma, D., & Kumar, N. (2017). A review on machine learning algorithms, tasks and applications. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 6(10), 2278-1323.
- [2] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393-422.
- [3] Challal, Y. (2008). Réseaux de capteurs sans fils. *Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France*, 17.
- [4] Yousef, Y. (2010). *Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil* (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse).
- [5] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393-422.
- [6] Cours LEACH Disponible sur <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7855660> le 16/02/2025
- [7] Cours LEACH Disponible sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Routage> le 16/02/2025
- [8] Singh, S. K., Singh, M. P., & Singh, D. K. (2010). Routing protocols in wireless sensor networks—a survey. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES)*, 1(2), 63-83.
- [9] Ibric, J. (2004). Cluster-based routing protocol in wireless sensor networks: Issues and challenges. *Proc. SPECTS, 2004*, 759-766.
- [10] Ali, M., & Sai Kumar, R. (2008). Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks.
- [11] Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3), 325-349.
- [12] Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., & Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4), 660-670.
- [13] Lindsey, S., & Raghavendra, C. S. (2002, March). PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings, IEEE aerospace conference* (Vol. 3, pp. 3-3). IEEE.
- [14] Lindsay, S., Raghavendra, C. S., & Sivalingam, K. M. (2001, April). Data gathering in sensor networks using the energy delay metric. In *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium* (p. 188).
- [15] Younis, O., & Fahmy, S. (2004, March). Distributed clustering in ad-hoc sensor networks : A hybrid, energy-efficient approach. In *IEEE INFOCOM 2004* (Vol. 1). IEEE.
- [16] Waware, S., Sarwade, N., & Gangurde, P. (2012). A review of power efficient hierarchical routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(2), 1096-1102.
- [17] Liu, X. (2012). A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *sensors*, 12(8), 11113-11153.
- [18] Boubiche, D. E., & Bilami, A. (2011). HEEP (Hybrid Energy Efficiency Protocol) based on chain clustering. *International Journal of Sensor Networks*, 10(1-2), 25-35.

- [19] Manjeshwar A., & Agrawal, D. P. (2001, April). TEEN: A Routing Protocol In *ipdps* (Vol. 1, No. 2001, p. 189).
- [20] Manjeshwar, A., & Agrawal, D. P. (2002, April). APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In *Parallel and distributed processing symposium, international* (Vol. 3, pp. 0195b-0195b). IEEE Computer Society.
- [21] Challal, Y. (2008). réseau de capteur sans fil>, support de cours.
- [22] Beydoun, K. (2009). Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. *Université de FRANCHE-COMTE, Thèse de doctorat*, 38-89.
- [23] TOUDJI, A., DLIMI, A., & DEMRI, M. (2017). *Une approche hybride pour conception d'un protocole de routage multi-saut dans les réseaux de capteur sans fil* (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR).
- [24] Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3), 325-349.
- [25] Zair, F. Z., & Zitoune, F. Z. (2024). *Étude et simulation d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie* (Doctoral dissertation, Université ibn khaldoun-Tiaret).
- [26] Boubiche, D. E. (2008). *Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil* (Doctoral dissertation, Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur).
- [27] Samra, B. *Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs* (Doctoral dissertation, Université de Béjaia -Abderrahmane Mir