

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Système de Télécommunications

Thème :

***Protocole de routage hiérarchique dans les réseaux
RCSF : Simulation et analyse de performance***

Présentée par :

Medadjelia Zohir

Chekkat Ilyes

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. SAYAD Djamel

Président

Dr. AMAMRA Imed

Encadreur

Dr. BOUDMEGH Naïm

Examineur

Promotion : 2025 / 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فَتَعَلَى اللَّهِ الْمَلِكُ الْحَقُّ وَلَا تَعْجَلْ بِالْقُرْآنِ مِنْ قَبْلِ أَنْ
يُقْضَىٰ إِلَيْكَ وَحْيُهُ وَقُل رَّبِّ زِدْنِي عِلْمًا

سورة طه - الآية 114

الحمد لله

والصلاة والسلام على نبينا محمد،
وعلى آله وصحبه، ومن والاه

Remerciements

En premier lieu, nous rendons grâce à **Allah** pour Ses bienfaits innombrables qu’Il nous a accordés tout au long de notre vie. Nous Le remercions de nous avoir permis de réaliser ce travail, ainsi que de nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour achever ce mémoire.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, **Dr AMAMRA Imed**, pour avoir accepté de nous encadrer et de diriger ce travail tout au long de l’année. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour ses efforts, sa disponibilité, ses précieux conseils et sa patience.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Président du jury, **Pr SAYAD Djamel**, pour l’honneur qu’il nous fait en présidant ce jury.

Nos sincères remerciements vont également à l’examineur, **Dr BOUDMEGH Naïm**, pour avoir accepté d’évaluer ce travail et pour l’intérêt qu’il lui porte.

Nous tenons aussi à remercier l’ensemble des enseignants du **département de génie électrique de l’Université du 20 Août 1955 – Skikda**, pour la qualité de la formation qu’ils nous ont dispensée durant notre cursus universitaire.

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l’accomplissement de ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos remerciements à nos collègues et amis de travail pour leur soutien moral et leur encouragement tout au long de ces dernières années d’études.

Dédicaces

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience, la force et la persévérance nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Je dédie ensuite ce modeste travail à mes chers parents, en reconnaissance de leurs sacrifices, de leur amour et de leur soutien tout au long de mon parcours.

À mon épouse et à mes enfants, pour leur patience, leur compréhension et leurs encouragements constants.

À toute ma famille, qui a toujours cru en moi et m'a soutenu dans les moments difficiles.

À mes amis, collègues et à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, leurs conseils et leur soutien durant cette aventure académique.

À l'ensemble des enseignants du département de Génie Électrique, pour la qualité de leur enseignement et leur contribution à notre formation.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Zohir.

Dédicaces

Avant tout, je remercie Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire à mes très chers parents, en témoignage de mon profond amour, de mon respect et de ma gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de me voir réussir.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur soutien et leurs encouragements.

À toute ma famille, pour leurs prières et leur confiance.

À mes amis, pour leur soutien moral et les moments de partage durant mon parcours universitaire.

À tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation et à mon épanouissement académique.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Ilyas.

Résumé :

Les RCSF représentent une technologie importante utilisée dans plusieurs domaines tels que l'environnement, l'industrie, la santé et les systèmes intelligents. Cependant, ces réseaux sont fortement limités par la consommation d'énergie des nœuds capteurs, ce qui influence directement la durée de vie du réseau. Dans ce travail, nous avons étudié les protocoles de routage hiérarchiques dans les réseaux RCSF, avec un intérêt particulier pour le protocole LEACH et ses améliorations.

Afin d'améliorer les performances du protocole LEACH, nous avons proposé une approche basée sur un mécanisme de score appelée LEACH-EDD-Score. Cette approche prend en compte l'énergie résiduelle, la distance au sink et la densité locale afin de sélectionner les Cluster Heads de manière plus efficace. Les simulations réalisées sous MATLAB ont permis de comparer les performances des protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score selon plusieurs métriques telles que la consommation d'énergie, la couverture du réseau et le nombre de paquets transmis. Les résultats obtenus montrent que le protocole proposé permet une meilleure couverture du réseau et une transmission plus efficace des données tout en maintenant une consommation énergétique équilibrée.

Mots clés : RCSF, routage hiérarchique, protocole LEACH, LEACH-EDD-Score, clustering, consommation d'énergie.

Abstract :

Wireless Sensor Networks (WSNs) are an important technology used in several fields such as environment, industry, healthcare, and intelligent systems. However, these networks are highly limited by the energy consumption of sensor nodes, which directly affects the network lifetime. In this work, we studied hierarchical routing protocols in WSNs, with particular interest in the LEACH protocol and its improvements.

In order to improve the performance of the LEACH protocol, we have proposed a score-based approach called LEACH-EDD-Score. This approach considers residual energy, distance to the sink, and local density in order to select Cluster Heads more efficiently. Simulations performed under MATLAB allowed the comparison of LEACH, LEACH-C, and LEACH-EDD-Score protocols according to several performance metrics such as energy consumption, network coverage, and the number of transmitted packets. The obtained results show that the proposed protocol provides better network coverage and more efficient data transmission while maintaining balanced energy consumption.

Keyword : Wireless Sensor Networks (WSN), hierarchical routing, LEACH protocol, LEACH-EDD-Score, clustering, energy consumption.

الملخص:

تعتبر شبكات الاستشعار اللاسلكية من التقنيات الحديثة المهمة المستخدمة في عدة مجالات مثل البيئة، الصناعة، الصحة والأنظمة الذكية. إلا أن هذه الشبكات تعاني من مشكلة استهلاك الطاقة محدودة المصدر (بطارية)، والتي تؤثر بشكل مباشر على مدة حياة الشبكة وأدائها. في هذا العمل قمنا بدراسة بروتوكولات التوجيه الهرمية في شبكات الاستشعار اللاسلكية مع التركيز على بروتوكول LEACH وبعض نسخه المحسنة.

من أجل تحسين أداء بروتوكول LEACH اقترحنا مقارنة تعتمد على آلية score تسمى LEACH-EDD Score. تعتمد هذه المقارنة على الطاقة المتبقية، والمسافة إلى sink، والكثافة المحلية من أجل اختيار رؤساء المجموعات بطريقة أكثر فعالية. كما تم إنجاز محاكاة باستعمال MATLAB لمقارنة البروتوكولات LEACH و LEACH-C و LEACH-EDD-Score اعتمادًا على عدة مؤشرات أداء، مثل استهلاك الطاقة، تغطية الشبكة وعدد الحزم المرسل. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن البروتوكول المقترح يسمح بتحسين مؤشر تغطية الشبكة وفعالية إرسال البيانات مع الحفاظ على استهلاك طاقة متوازن.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، التوجيه الهرمي، بروتوكول LEACH ، LEACH-EDD-Score ، clustering، استهلاك الطاقة.

Table des matières :

Résumé :	i
Abstract :	ii
:الملخص	iii
Table des matières :	iv
Liste des abréviations :	viii
Liste des symboles :	x
Liste des Figures :	xii
Liste des Tableaux :	xiv
Introduction générale :	1

Chapitre 1: Généralités sur les RCSF

1.1 Introduction :	4
1.2 Historique des réseaux de capteurs sans fil :	4
1.3 Réseaux Ad hoc :	5
1.4 Définition d'un réseau RCSF :	6
1.4.2 L'agrégateur (aggregator) :	7
1.4.3 Le puits (sink) :	7
1.5 Les domaines d'application des RCSF :	7
1.5.1 Application militaire :	7
1.5.2 Applications Surveillance et Sécurité :	8
1.5.3 Application Environnementales :	9
1.5.4 Application Economique :	10
1.5.5 Application Médicales :	11
1.6 L'architecture d'un RCSF :	12
1.6.1 Architecture d'un réseau de capteurs :	12
1.6.1.1 Les différents facteurs de conception :	12
1.6.1.2 Caractéristiques des réseaux de capteurs :	13
1.6.1.3 Types de Déploiement dans les (RCSF) :	14
1.6.1.3.1 Déploiement déterministe et déploiement stochastique :	14
1.6.1.3.2 Déploiement mono-objectif et multi-objectif :	14
1.6.1.3.3 Déploiement homogène et hétérogène :	15
1.6.1.3.4 Déploiement statique et dynamique :	15
1.6.2 Architecture générale des nœuds de capteurs sans fil :	16
1.6.3 Pile protocolaire (Modèle en couches) :	18

1.6.3.1 La couche physique :	19
1.6.3.2 La couche liaison de données :	19
1.6.3.3 La couche réseau :	20
1.6.3.4 La couche transport :	20
1.6.3.5 La couche application :	21
1.6.3.6 Le niveau de gestion d'énergie :	21
1.6.3.7 Le niveau de gestion de mobilité :	21
1.6.3.8 Le niveau de gestion des tâches :	22
1.7 Conclusion :	22

Chapitre 2 : Les protocoles de routage dans les RCSF

2.1 Introduction :	24
2.2 Définition des protocoles MAC (Medium Access Control Protocoles) :	24
2.2.1 Types de protocoles MAC :	24
2.2.1.1 Protocoles MAC à contention :	24
2.2.1.2 Protocoles MAC planifiés (ou déterministes) :	25
2.2.1.3 Protocoles MAC à jeton :	25
2.3 Définition des protocoles de routage dans les RCSF :	25
2.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSF :	26
2.4.1 Le type de protocole :	26
2.4.1.1 Protocole de routage basé sur les interrogations	26
2.4.1.2 Protocole de routage basé sur la QoS :	26
2.4.1.3 Protocole de routage multi-chemin :	26
2.4.1.4 Protocole de routage basé sur la négociation des données :	27
2.4.2 La structure du réseau :	27
2.4.2.1 Les protocoles de routage plat (flat based-routing) :	27
2.4.2.2 Les protocoles de routage avec localisation géographique	28
2.4.2.3 Les protocoles de routage hiérarchique :	29
2.5 Exemples de protocoles de routage hiérarchiques :	30
2.5.1 Le protocole LEACH :	30
2.5.2 Le protocole PEGASIS :	31
2.5.3 Le protocole TEEN :	32
2.5.4 Le protocole APTEEN :	32
2.5.5 Le protocole DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) :	33
2.5.6 Le protocole NEEC (Novel Energy Efficient Clustering) :	33
2.6 Conclusion :	35

Chapitre 3 : Le protocole de routage hiérarchique LEACH

3.1 Introduction :	38
3.2 L'objectif et fonctionnement fondamental du protocole LEACH :	38
3.3 Les phases opérationnelles du protocole LEACH :	39
3.3.1 La phase d'initialisation :	39
3.3.2 La phase de transmission de données (steady state phase) :	41
3.4 Les avantages du protocole LEACH :	43
3.5 Limitations de protocole LEACH :	43
3.6 Amélioration du protocoles LEACH :	44
3.6.1 Le protocole LEACH-C :	44
3.6.1.1 Principe de fonctionnement :	45
3.6.1.1.1 Phase d'initialisation (Set-up Phase) :	45
3.6.1.1.2 Phase de transmission (Steady-State Phase) :	47
3.6.2 Le protocole PEGASIS :	47
3.6.3 Le protocole LEACH-GA :	48
3.6.4 Le protocole ACA-LEACH :	48
3.6.5 Le protocole LEACH-FL :	49
3.6.6 Le protocole LEACH-KED :	49
3.7 Conclusion :	51

Chapitre 4 : Simulation et analyse des performances des protocoles étudiés

4.1 Introduction :	53
4.2 Environnement de simulation :	53
4.2.1 Matériel utilisé :	53
4.2.2 Logiciel utilisé :	53
4.3 Simulation :	55
4.3.1 Déploiement du réseau :	55
4.3.2 Fonctionnement de la simulation :	56
4.4 Présentation des protocoles étudiés :	58
4.4.1 Le Protocole LEACH :	58
4.4.2 Le Protocole LEACH-C :	58
4.4.3 Le Protocole proposé (LEACH-EDD-Score) :	58
4.4.3.1 Critères utilisés :	59
4.4.3.2 Calcul du score :	60
4.4.3.3 Sélection des Cluster Heads :	61
4.4.3.4 Fonctionnement du protocole LEACH-EDD-Score :	61

4.5 Résultats et analyse :	63
4.5.1 Distribution des CHs élues et densité des clusters en fonction du temps :	63
4.5.2 Calcul de l'Energie résiduelle des nœuds :	67
4.5.3 Evolution de la Couverture du réseau :	68
4.5.4 Evolution du nombre de nœuds actifs :	70
4.5.5 Comparaison du nombre de Cluster Heads par round :	71
4.5.6 Throughput ou nombre de paquets transmis :	73
4.5.7 Comparaison des trois protocoles avec les métriques FND / HND / LND :	74
4.5.8 Comparaison globale des performances :	76
4.6 Conclusion :	77
Conclusion générale :	78
Perspectives :	80
Bibliographie :	81

Liste des abréviations :

APTEEN : Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network

BS : Base Station

CH : Cluster Head

CHs : Cluster Heads

DEEC : Distributed Energy Efficient Clustering

DSN : Distributed Sensor Networks

FND : First Node Dead

FTP : File Transfer Protocol

GPS : Global Positioning System

HND : Half Nodes Dead

HTTP : HyperText Transfer Protocol

IoT : internet of things

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LEACH-C : LEACH Centralized

LEACH-FL : Fuzzy Logic based LEACH

LEACH-GA : LEACH basée sur l'utilisation des algorithmes génétiques

LEACH-KED : K-Means Energy Distance

LEACH-EDD-Score : LEACH based on Energy, Distance and Density Score

LND : Last Node Dead

MAC : Medium Access Control

MANET : Mobile Ad hoc Network

MATLAB : Matrix Laboratory

MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems

NEEC : Novel Energy Efficient Clustering

PDR : Packet Delivery Ratio

QoS : Quality of Service

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fil

SMTP : Simple Mail Transfer Protocol

TCP : Transmission Control Protocol

TEEN : Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network

UDP : User Datagram Protocol

WSN : Wireless Sensor Network

Liste des symboles :

P : Pourcentage souhaité de nœuds **cluster-head** dans le réseau (par exemple, 5 %).

n : Identifiant d'un nœud particulier.

r : Round (cycle) en cours d'exécution du protocole.

G : Ensemble des nœuds qui **n'ont pas encore été élus** comme cluster-head lors des rounds précédents.

E_{avg} : est l'énergie moyenne des nœuds dans le réseau.

E_i : est l'énergie résiduelle du nœud.

N : est le nombre total de nœuds.

M : représente la surface du réseau.

d_{toBS}^2 : est la distance moyenne vers la station de base.

P_k : est la probabilité d'accepter la nouvelle solution.

e : est la constante d'Euler (≈ 2.718).

$f(C1)$: est la valeur de la fonction objective pour la nouvelle solution.

$f(C)$: est la valeur de la fonction objective pour la solution actuelle.

α_k : est le paramètre de température utilisé dans l'algorithme de recuit simulé.

E_{TX} : Energie d'émission

E_{RX} : Energie de réception

E_{fs} : Amplification free space

E_{mp} : Amplification multipath

E_{DA} : Energie d'agrégation

k : Représente la taille du paquet de données

d_0 : Distance seuil

w_E : Poids de l'énergie résiduelle

w_D : Poids de la distance au sink

w_N : Poids de la densité locale

E_{max} : énergie maximale (souvent l'énergie initiale)

$D_{i,norm}$: représente la distance normalisée entre le nœud (i) et le sink.

D_i : distance entre le nœud et le sink

D_{max} : distance maximale dans le réseau

$N_{i,norm}$: représente la densité locale normalisée du nœud (i).

N_i : nombre de voisins du nœud i

N_{max} : nombre maximale de voisins

Liste des Figures :

Figure 1.1 : Exemple d'Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc.....	5
Figure 1.2 : Exemple d'un réseau de capteurs sans fil.....	6
Figure 1.3 : Application des RCSF dans le domaine militaire.....	8
Figure 1.4 : Application des RCSF dans le domaine de surveillance et de sécurité.....	9
Figure 1.5 : Application des RCSF dans le domaine environnemental.....	10
Figure 1.6 : Application des RCSF dans le domaine économique.....	11
Figure 1.7 : Application des RCSF dans le domaine médical.....	11
Figure 1.8 : Architecture d'un réseau de capteurs.....	12
Figure 1.9 : Architecture du nœud de capteur.....	18
Figure 1.10 : La pile Protocolaire dans les RCSF.....	19
Figure 2.1 : Protocoles de routage selon le type de protocole.....	26
Figure 2.2 : Protocoles de routage selon la structure du réseau.....	27
Figure 2.3 : Exemple du protocole de routage plat.....	28
Figure 2.4 : Protocoles basés sur la localisation géographique.....	29
Figure 2.5 : Exemple d'un protocole hiérarchique.....	30
Figure 2.6 : Le principe du protocole LEACH.....	31
Figure 2.7 : Chaînage dans PEGASIS.....	32
Figure 2.8 : Le schéma fonctionnel de l'algorithme NEEC.....	34
Figure3.1 : Les phases utilisées par le protocole LEACH.....	39
Figure3.2 : L'organigramme de la phase d'initialisation.....	40
Figure 3.3 : La répartition du temps utilisée dans la phase de transmission.....	41
Figure 3.4: Organigramme de la phase de transmission (steady state phase)	42
Figure 3.5: Évolution des protocoles LEACH améliorés.....	44
Figure 4.1 : Éditeur MATLAB utilisé pour la simulation.....	54
Figure 4.2 : Déploiement initial des nœuds.....	55
Figure 4.3 : Organigramme du protocole LEACH-EDD-Score.....	62
Figure 4.4 : Évolution spatiale des clusters pour LEACH.....	64
Figure 4.5 : Évolution spatiale des clusters pour LEACH-C.....	65

Figure 4.6 : Évolution spatiale des clusters pour LEACH-EDD-Score.....	66
Figure 4.7 : Energie résiduelle	67
Figure 4.8 : Couverture du réseau.....	69
Figure 4.9 : Nombre de nœuds vivants.....	70
Figure 4.10 : Nombre de Cluster Heads par round.....	72
Figure 4.11 : Paquets cumulés vers le sink.....	73
Figure 4.12 : Comparaison de la durée de vie du réseau (FND, HND, LND)	75
Figure 4.13 : Comparaison des performances moyennes des protocoles.....	76

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1 : Stratégies de déploiement et indicateurs de performance.....	16
Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif des protocoles de routage.....	35
Tableau 3.1 : Tableau comparatif des améliorations de LEACH.....	50
Tableau 4.1 : Paramètres de simulation.....	57

Introduction générale :

Les RCSF connaissent un développement important grâce aux avancées technologiques dans les domaines des communications sans fil, de l'électronique et des systèmes embarqués. Ces réseaux sont constitués d'un ensemble de nœuds capteurs capables de collecter, traiter et transmettre des données vers une station de base appelée sink.

Les RCSF sont aujourd'hui utilisés dans plusieurs domaines tels que la surveillance environnementale, les applications militaires, médicales, industrielles et les systèmes intelligents. Leur capacité à fonctionner dans des environnements difficiles et sans infrastructure fixe leur confère une grande importance dans les systèmes modernes de communication et de surveillance.

Par ailleurs, l'essor de l'Internet des Objets (IoT) a renforcé l'importance des RCSF en leur offrant de nouvelles perspectives d'intégration et d'interconnexion. Grâce à cette complémentarité, les données collectées par les capteurs peuvent être exploitées à grande échelle pour assurer le suivi, la supervision et l'automatisation de nombreux systèmes connectés. Cette convergence entre les RCSF et l'IoT constitue aujourd'hui un axe majeur du développement des technologies intelligentes.

Les RCSF présentent de nombreux avantages, notamment leur faible coût de déploiement, leur flexibilité, leur capacité d'auto-organisation ainsi que leur aptitude à surveiller des environnements difficiles d'accès. Ces caractéristiques expliquent leur adoption croissante dans de nombreux domaines d'application.

Cependant, le fonctionnement efficace des RCSF dépend de plusieurs ressources limitées au niveau des nœuds capteurs, notamment l'énergie, la mémoire et la capacité de calcul. Parmi ces ressources, l'énergie occupe une place particulièrement importante, car elle influence directement la durée de vie du réseau ainsi que la qualité des communications.

Dans ce contexte, les protocoles de routage jouent un rôle essentiel dans l'organisation des échanges de données entre les nœuds et dans l'optimisation de la consommation énergétique. Afin de répondre aux exigences des différentes applications, plusieurs approches de routage ont été développées dans les RCSF, notamment les protocoles plats, géographiques et hiérarchiques.

Les protocoles hiérarchiques, basés sur le principe de clustering, permettent de réduire la consommation énergétique en organisant le réseau en groupes appelés clusters. Parmi ces

protocoles, LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est considéré comme l'un des protocoles les plus connus grâce à sa simplicité et sa capacité à répartir le rôle de Cluster Head entre les nœuds.

Cependant, le protocole LEACH présente certaines limites liées principalement à la sélection aléatoire des Cluster Heads, ce qui entraîne parfois une mauvaise répartition de l'énergie et une diminution des performances du réseau.

Afin d'améliorer ces performances, plusieurs variantes du protocole LEACH ont été proposées, telles que LEACH-C, LEACH-FL et LEACH-KED. Dans ce travail, nous proposons une amélioration basée sur un mécanisme de score appelée LEACH-EDD-Score. Cette approche prend en compte plusieurs critères, notamment l'énergie résiduelle, la distance au sink et la densité locale, afin d'optimiser la sélection des Cluster Heads.

La problématique principale des réseaux de capteurs sans fil réside donc dans la gestion efficace de l'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau tout en maintenant une bonne couverture et une transmission efficace des données.

L'objectif de ce travail est de comparer les performances des protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score à travers des simulations réalisées sous MATLAB, en utilisant plusieurs métriques telles que la consommation d'énergie, la couverture du réseau, le nombre de paquets transmis ainsi que les indicateurs FND, HND et LND.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les généralités sur les réseaux de capteurs sans fil. Le deuxième chapitre est consacré aux protocoles de routage dans les RCSF. Le troisième chapitre présente le protocole LEACH ainsi que ses améliorations. Enfin, le quatrième chapitre traite la simulation, les résultats obtenus et leur analyse comparative.

Chapitre 1

Généralités sur les RCSF

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts liés à la technologie des RCSF avant d'entamer l'analyse et la simulation de notre système. Les principales caractéristiques ainsi que les aspects liés à la simulation des réseaux de capteurs sans fil seront abordées dans cette partie.

De nos jours, les applications de ces réseaux sont largement répandues dans plusieurs domaines tels que l'industrie, l'agriculture, l'environnement, le commerce, la sécurité, la santé etc.

1.2 Historique des RCSF :

Les RCSF trouvent leurs origines dans les applications militaires développées durant les années 1960, où des systèmes de surveillance composés de capteurs étaient utilisés pour la détection et la collecte d'informations dans des environnements hostiles. Ces premiers systèmes étaient généralement coûteux, volumineux et nécessitaient une infrastructure importante.

Au cours des années 1980, le concept de **Distributed Sensor Networks (DSN)** a émergé, introduisant l'idée d'un ensemble de capteurs distribués capables de coopérer pour collecter et transmettre des données vers un centre de traitement [1].

L'évolution rapide des technologies électroniques dans les années 1990, notamment les **microprocesseurs à faible consommation d'énergie**, les systèmes **MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)** et les technologies de communication sans fil, a permis la miniaturisation des capteurs et la réduction de leur coût, ouvrant ainsi la voie au développement des RCSF modernes [2].

À partir des années 2000, ces réseaux ont connu un essor considérable grâce à la mise au point de plateformes matérielles dédiées et de protocoles de communication adaptés aux contraintes énergétiques des nœuds capteurs. Depuis, les RCSF sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la surveillance environnementale, la médecine, l'industrie et les maisons intelligentes [3].

1.3 Réseaux Ad hoc :

Un réseau Ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network), est une collection d'unités mobiles munies d'interfaces de communication sans-fil, formant un réseau temporaire sans recourir à aucune infrastructure fixe ou administration centralisée. Dans de tels environnements, les unités se comportent comme des hôtes et/ou des routeurs [4].

Les nœuds des MANET sont équipés d'émetteurs et de récepteurs sans-fil utilisant des antennes qui peuvent être omnidirectionnelles (broadcast), fortement directionnelles (point à point), ou une combinaison de ces deux types. Ils maintiennent d'une manière coopérative la connectivité du réseau, en fonction de leurs positions, la configuration de leurs émetteurs/récepteurs, la puissance de transmission et les interférences entre les canaux de communication.

La modélisation de cette connectivité est détaillée dans la section suivante. Un réseau ad hoc peut être isolé, mais il peut aussi avoir des passerelles ou des interfaces qui le relient à un réseau fixe.

La figure 1.1 illustre un exemple d'Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc.

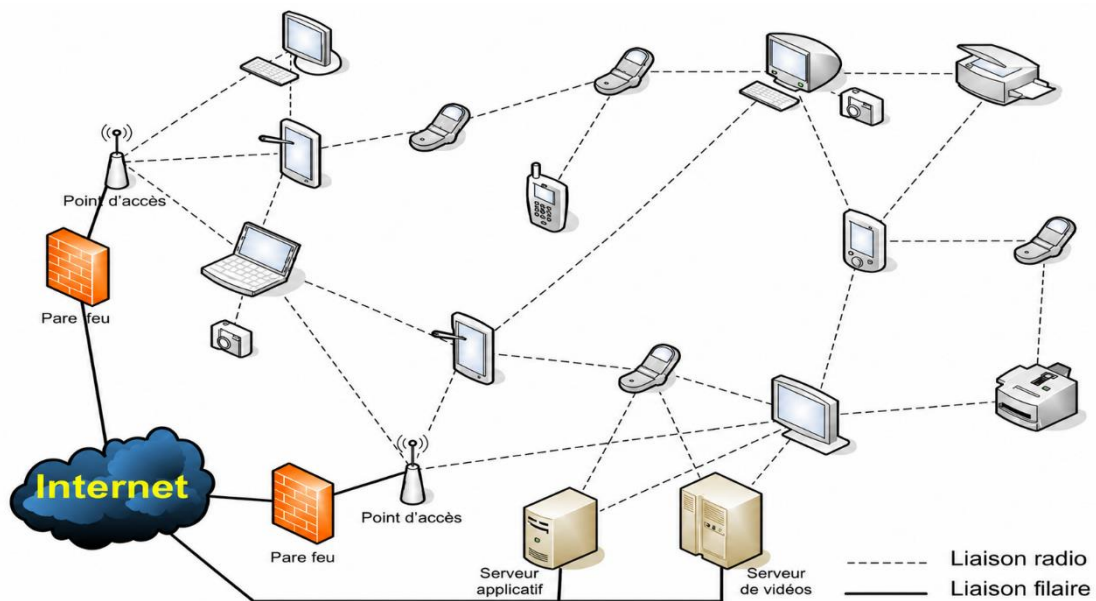


Figure 1.1 : Exemple d'Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc

1.4 Définition d'un réseau RCSF :

Les réseaux de capteurs sans-fil sont considérés comme un type spécial de réseaux Ad hoc et sont significativement différents des réseaux MANET traditionnels. En effet, dans un réseau MANET, l'organisation des tâches, le routage ainsi que la gestion de mobilité sont principalement réalisés pour optimiser la qualité de service (QoS) et offrir une meilleure bande passante, sans contrainte énergétique stricte.

Par ailleurs, comme leurs batteries peuvent être remplacées lorsque nécessaire, la consommation d'énergie n'est pas une priorité critique dans les MANET classiques.

Le RCSF peut être défini comme un réseau de nœuds capables de détecter des phénomènes dans l'environnement et de transférer les informations collectées depuis la zone surveillée (par exemple une région ou un volume donné) au moyen de connexions sans fil [1].

Il est constitué de nœuds capteurs individuels, déployés dans une zone donnée, qui collectent et transmettent des données vers une entité principale afin de surveiller des conditions physiques ou environnementales.

L'entité principale, également appelée station de base ou récepteur (sink), peut être connectée à une infrastructure ou à Internet via une passerelle, ce qui permet aux utilisateurs d'accéder aux données collectées à distance et de surveiller leurs systèmes en temps réel [3].

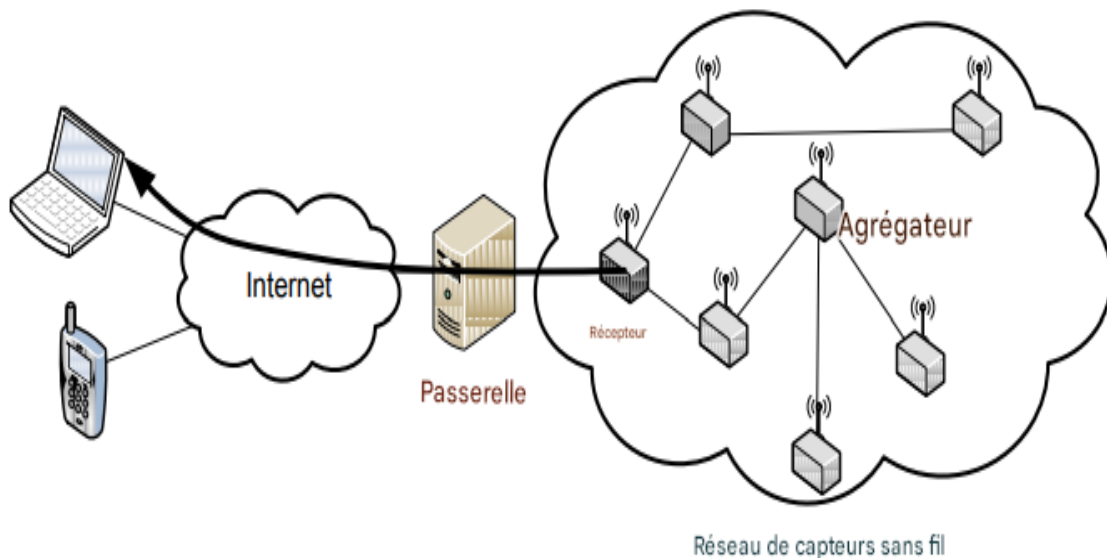


Figure 1.2 : Exemple d'un réseau de capteurs sans fil

La Figure 1.2 représente l'architecture habituelle des réseaux de capteurs sans fils.

Ils sont construits autour des quatre principales entités suivantes :

1.4.1 Le capteur (sensor) :

Comme le dit bien son nom, il est en charge de mesurer une valeur relative à son environnement (température, pression, luminosité, présence, etc.). Internet Wireless Sensor Network Sink Gateway Aggregator. On peut parfois rencontrer des capteurs-actionneurs qui non seulement mesureront mais auront aussi pour rôle d'entreprendre une action en fonction de la valeur mesurée. L'intelligence nécessaire à la prise de décision quant à l'action à entreprendre peut alors être déportée sur un autre nœud du réseau [5].

1.4.2 L'agrégateur (aggregator) :

Il est en charge d'agréger les messages qu'il reçoit de plusieurs capteurs puis de les envoyer en un seul message au puits (sink). Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau et donc de prolonger la durée de vie globale du réseau de capteur. Il correspond généralement à la tête d'une grappe (cluster head). L'utilisation de grappes offre de nombreux intérêts à tous les niveaux, notamment pour le routage [1][3].

1.4.3 Le puits (sink) :

Le puits est le nœud final du réseau. C'est à lui qu'est envoyé l'ensemble des valeurs mesurées par le réseau. Il peut arriver qu'il y ait plusieurs puits sur un même réseau de capteurs [5].

1.4.4 La passerelle (gateway) :

La passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il permet de relier le réseau de capteurs sans fils à un réseau plus traditionnel, typiquement l'internet. En effet, habituellement le réseau de capteurs ne sert qu'à faire remonter les mesures, les applications traitant ces informations étant exécutées sur la machine de l'utilisateur final [1][5].

1.5 Les domaines d'application des RCSF :

Les RCSF constituent des solutions innovantes dans les domaines suivants :

1.5.1 Application militaire :

Le déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Déploiement sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller

toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (par la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations [6].

La figure 1.3 illustre l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine militaire.



Figure 1.3 : Application des RCSF dans le domaine militaire

1.5.2 Applications Surveillance et Sécurité :

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent jouer un rôle essentiel dans la sécurité et la surveillance des infrastructures. Intégrés dans les bâtiments, les voies ferrées ou les barrages, ils permettent de détecter des altérations structurelles, des intrusions ou des fuites d'eau sans nécessiter de connexions filaires ni d'alimentation continue, grâce à leur fonctionnement périodique et autonome sur de longues durées.

Leur architecture distribuée rend le système difficile à neutraliser, car il ne repose pas sur un point critique unique. Ainsi, l'utilisation des RCSF dans le domaine de la sécurité offre une solution plus efficace et moins coûteuse que les mécanismes traditionnels [7].

La figure 1.4 illustre l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine Surveillance et Sécurité.

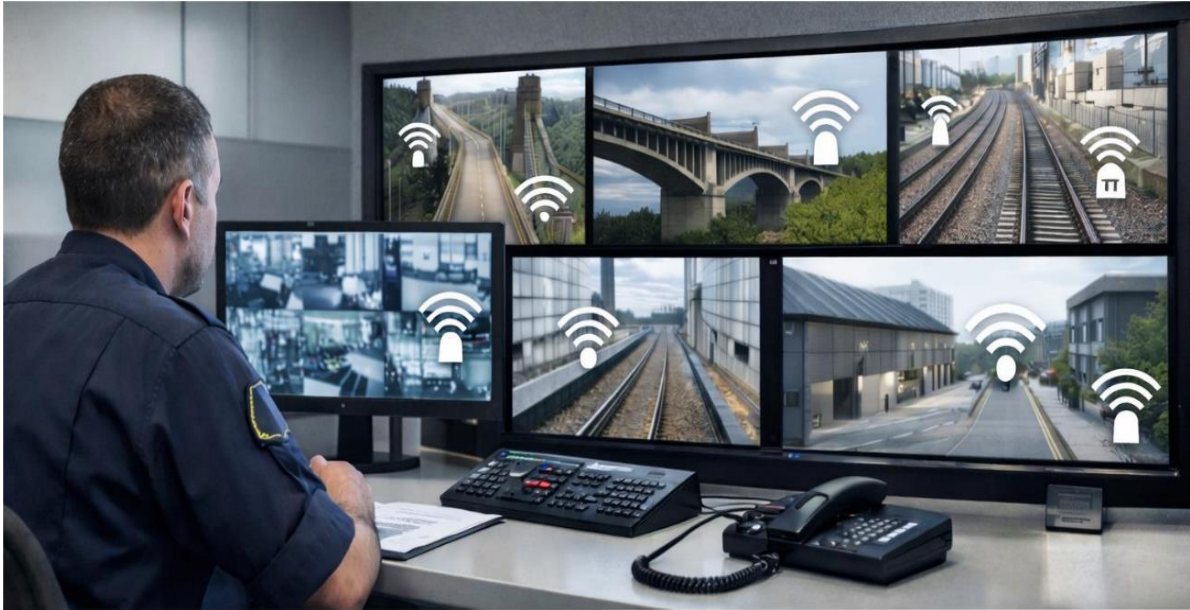


Figure 1.4 : Application des RCSF dans le domaine de surveillance et de sécurité

1.5.3 Application Environnementales :

Les réseaux de capteurs sans fil offrent de nombreuses applications dans les domaines environnementaux, agricoles et industriels.

Des capteurs thermiques dispersés en forêt peuvent détecter rapidement les débuts d'incendie, améliorant ainsi l'efficacité des interventions.

En agriculture, des capteurs intégrés aux champs permettent d'identifier les zones sèches et d'optimiser l'irrigation.

Dans des sites industriels sensibles, tels que les centrales nucléaires ou les pétroliers, ils assurent la détection rapide de fuites toxiques (gaz, produits chimiques, substances radioactives ou pétrole) [8].

La figure 1.5 illustre l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine environnemental.



Figure 1.5 : Application des RCSF dans le domaine environnemental

1.5.4 Application Economique :

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé peut être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison.

Il devient alors possible pour un client d'avoir un suivi en temps réel et de connaître la position actuelle du colis. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettent de suivre le processus de production, depuis les matières premières jusqu'au produit final livré [8].

La figure 1.6 illustre l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine économique.



Figure 1.6 : Application des RCSF dans le domaine économique

1.5.5 Application Médicales :

La surveillance des fonctions essentielles de l'être humain serait des micro-capteurs pouvant être ingérés ou implantés sous la peau. Elles ont la capacité, sans faire appel à la chirurgie, de communiquer des images provenant de l'intérieur d'un réseau de capteurs en médecine pourraient offrir une surveillance suivie constante des patients et une capacité à recueillir des données physiologiques de meilleure qualité, ce qui simplifie le diagnostic de certaines maladies [9].

La figure 1.7 illustre l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine médical.



Figure 1.7 : Application des RCSF dans le domaine médical

1.6 L'architecture d'un RCSF :

1.6.1 Architecture d'un réseau de capteurs :

Les réseaux de capteurs sont généralement constitués de nombreux nœuds répartis sur une zone spécifique (champ de capteurs). Ces nœuds se connectent à une ou plusieurs passerelles (nœuds d'agrégation) pour permettre l'interconnexion avec d'autres réseaux (Internet, satellites, etc.) et la récupération des données [10].

La figure 1.8 illustre l'architecture d'un réseau de capteurs.

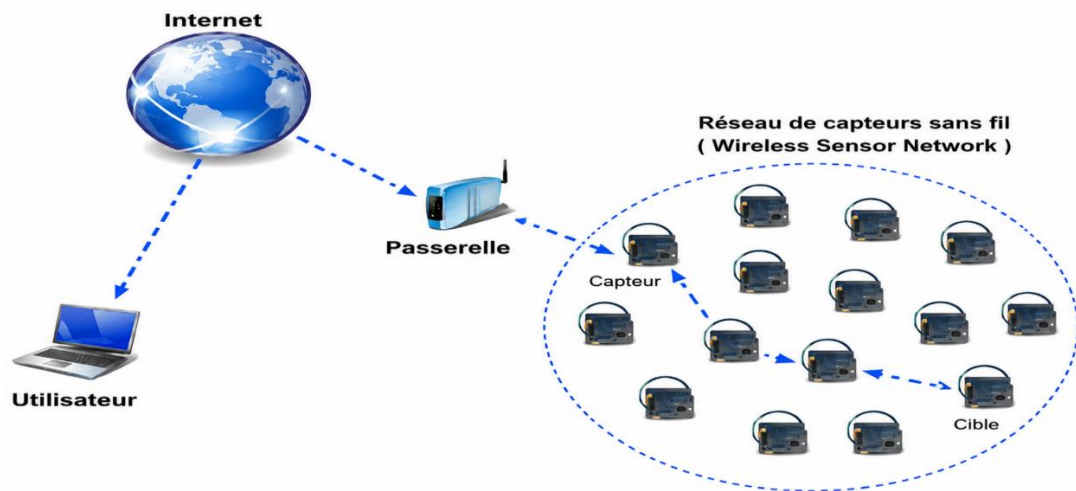


Figure 1.8 : Architecture d'un réseau de capteurs

1.6.1.1 Les différents facteurs de conception :

La conception des réseaux de capteurs est influencée par divers facteurs, tels que la tolérance aux pannes, le coût de production, la consommation d'énergie, l'environnement et la topologie du réseau. Ces facteurs constituent le fondement de la conception des protocoles ou algorithmes des réseaux de capteurs.

a) Tolérance aux pannes :

Les nœuds peuvent tomber en panne en raison de problèmes de fabrication (ce sont des composants peu coûteux produits en série, ce qui rend les défaillances de capteurs possibles) ou, plus fréquemment, de coupures de courant. Des facteurs externes (chocs, interférences) peuvent également provoquer des pannes. Afin d'éviter que ces pannes n'affectent le fonctionnement essentiel du réseau, il est impératif d'évaluer sa capacité à fonctionner sans interruption.

b) Coût de fabrication :

Les nœuds sont des dispositifs produits en grande quantité en raison de leur nombre élevé. Par conséquent, leur coût de production doit rester faible afin de ne pas augmenter le coût global du réseau.

1.6.1.2 Caractéristiques des réseaux de capteurs :

Supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt.

a) Topologie du réseau :

En raison de leur forte densité dans la zone à observer, les nœuds capteurs doivent être capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :

b) Déploiement :

Les nœuds peuvent être distribués de manière prédéfinie ou aléatoire (par exemple, largués en masse depuis un avion). Ils doivent alors s'organiser de façon autonome.

c) Post-déploiement (Exploitation) :

Durant cette phase, la topologie du réseau peut évoluer en raison de déplacements des nœuds ou de défaillances matérielles.

d) Redéploiement :

L'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant nécessite une mise à jour de la topologie.

e) Consommation d'énergie :

L'économie d'énergie constitue l'une des problématiques majeures des réseaux de capteurs. En effet, la recharge ou le remplacement des sources d'alimentation est souvent coûteux, voire impossible dans certains environnements. Il est donc essentiel que les capteurs optimisent leur consommation énergétique afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Par ailleurs, les réseaux de capteurs fonctionnent généralement selon un mécanisme de routage multi-saut, où chaque nœud participe à la transmission des données. Ainsi, la

défaillance d'un nœud peut entraîner une modification de la topologie et nécessite une réorganisation du réseau.

1.6.1.3 Types de Déploiement dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) :

Le déploiement constitue une étape fondamentale dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF). Il consiste à déterminer le positionnement optimal d'un ensemble de nœuds capteurs dans une zone cible afin de satisfaire des exigences de performance telles que la couverture, la connectivité, la consommation énergétique et la qualité de service (QoS). Plusieurs stratégies de déploiement ont été proposées dans la littérature afin de répondre aux contraintes spécifiques des différents environnements d'application [11].

1.6.1.3.1 Déploiement déterministe et déploiement stochastique :

a) Le déploiement déterministe :

Correspond à un positionnement planifié et prédéfini des capteurs. Il est utilisé dans des environnements accessibles et non hostiles, où l'emplacement des nœuds peut être choisi avec précision selon une stratégie d'optimisation. Cette approche garantit une meilleure couverture et une configuration optimale du réseau.

b) Le déploiement stochastique (ou non déterministe) :

Employé dans des environnements difficiles d'accès ou hostiles. Dans ce cas, les capteurs sont généralement dispersés de manière aléatoire (par exemple, largués depuis un aéronef). Bien que cette méthode offre une grande flexibilité, elle peut entraîner une couverture non uniforme et une connectivité moins prévisible.

1.6.1.3.2 Déploiement mono-objectif et multi-objectif :

L'optimisation du déploiement repose souvent sur plusieurs critères contradictoires. Par exemple, l'augmentation de la couverture peut entraîner une consommation énergétique plus élevée.

a) Le déploiement mono-objectif :

Visé à optimiser un seul critère (comme la couverture ou la durée de vie du réseau).

b) Le déploiement multi-objectif :

Cherche à équilibrer plusieurs critères simultanément (couverture, énergie, connectivité, QoS), souvent à l'aide de fonctions d'agrégation pondérées afin d'obtenir un compromis optimal.

1.6.1.3.3 Déploiement homogène et hétérogène :

Le choix entre une architecture homogène ou hétérogène dépend du domaine d'application :

a) Un RCSF homogène :

Cst composé de capteurs ayant les mêmes capacités (énergie, stockage, traitement, communication).

b) Un RCSF hétérogène :

Comprend des capteurs aux caractéristiques ou rôles différents, ce qui permet une meilleure spécialisation fonctionnelle mais augmente la complexité de gestion du réseau.

1.6.1.3.4 Déploiement statique et dynamique :

En fonction de la mobilité des nœuds, on distingue :

a) Le déploiement statique :

Où les capteurs restent fixes après leur installation. Cette stratégie est simple et permet d'économiser l'énergie liée à la mobilité, mais elle ne s'adapte pas aux changements dynamiques de l'environnement.

b) Le déploiement dynamique (ou mobile) :

Où les nœuds peuvent se repositionner durant le fonctionnement du réseau. Cette approche améliore l'adaptabilité, notamment pour la couverture de cibles mobiles, mais elle implique une consommation énergétique supplémentaire et une complexité accrue de contrôle.

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales, les métriques associées et les scénarios d'application [11].

Tableau 1.1 Stratégies de déploiement vs. Indicateurs de performance et scénarios idéaux

Stratégie	Métriques clés	Scénarios idéaux
Déploiement déterministe /statique	Couverture élevée, connectivité assurée, faible coût de mobilité	Sites industriels, bâtiments intelligents, environnements contrôlés
Déploiement stochastique	Connectivité probabiliste, coût de planification faible	Zones hostiles, catastrophes naturelles, champs de bataille
Déploiement en Grille	Couverture uniforme, connectivité prévisible	Agriculture de précision, surveillance environnementale
Optimisation mono-objectif	Maximisation d'un seul critère (ex : couverture)	Applications avec exigence prioritaire stricte
Optimisation multi-objectif	Compromis couverture /énergie /QoS	Réseaux critiques nécessitant équilibre performance-durée de vie
Architecture homogène	Uniformité, gestion simplifiée	Déploiements à grande échelle à faible coût
Architecture hétérogène	Rôles spécialisés, fonctionnalités étendues	Industrie, réseaux intelligents, agriculture intelligente

1.6.2 Architecture générale des nœuds de capteurs sans fil :

La première étape dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) consiste à développer des nœuds adaptés aux exigences spécifiques de l'application visée. Étant donné le grand nombre de nœuds généralement déployés, ceux-ci doivent être de petite taille, peu coûteux et économes en énergie, tout en disposant de capacités suffisantes de stockage, de traitement et de communication [12].

En raison de leurs contraintes dimensionnelles et économiques, les nœuds capteurs ne peuvent pas intégrer des batteries de grande capacité ni être alimentés par le réseau électrique. Les exigences de faible consommation énergétique et de réduction des coûts conduisent à l'utilisation de microcontrôleurs à basse consommation et d'émetteurs-récepteurs radio de faible puissance, offrant une bande passante limitée et une portée de transmission restreinte.

Par conséquent, la conception des nœuds capteurs est fortement contrainte par leurs capacités de calcul, de stockage et de communication [12].

De manière générale, un nœud capteur est constitué de quatre sous-systèmes principaux :

a) Sous-système de détection :

Composé d'un ou plusieurs capteurs (et éventuellement d'actionneurs) permettant d'interagir avec l'environnement physique ;

b) Sous-système de traitement :

Comprenant un microcontrôleur ou microprocesseur associé à une mémoire pour le stockage et le traitement des données collectées ;

c) Sous-système de communication :

Constitué d'un module radio assurant la transmission et la réception des données sans fil.

d) Sous-système d'alimentation :

Généralement basé sur une batterie, fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement du nœud. Des dispositifs de récupération d'énergie peuvent être intégrés afin de prolonger la durée de vie du système.

L'architecture typique d'un nœud capteur sans fil est illustrée à la Figure 1.9 qui montre l'interconnexion entre les différents sous-systèmes.

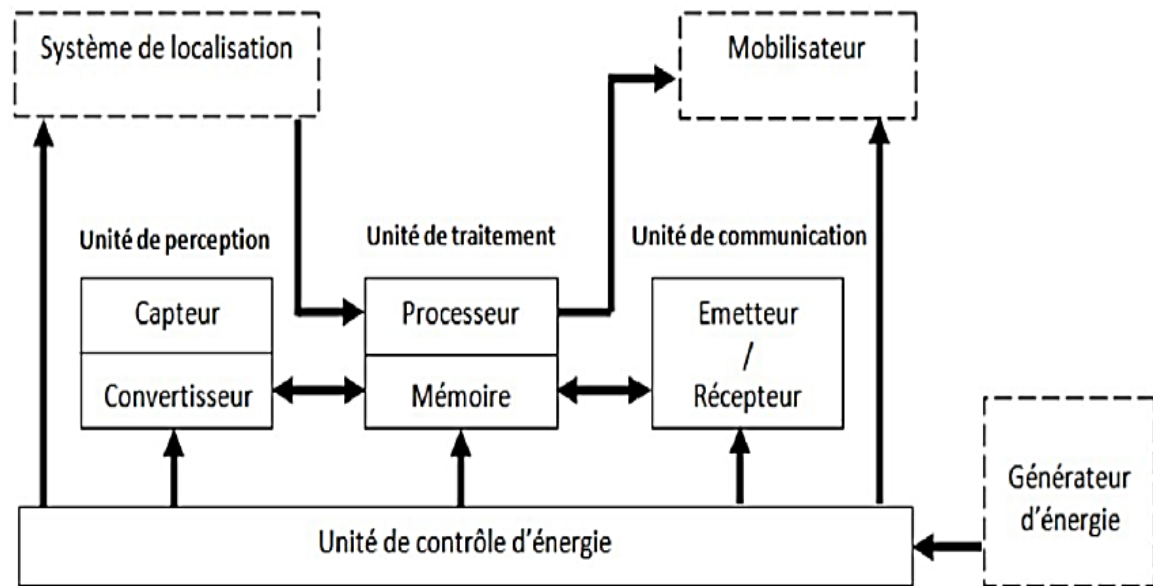


Figure 1.9 : Architecture du nœud de capteur [12]

1.6.3 Pile protocolaire (Modèle en couches) :

L'architecture en couches d'un réseau de capteurs sans fil permet d'organiser et de normaliser la communication entre les composants du réseau, afin de garantir la compatibilité entre différents fabricants. Elle est composée de cinq couches principales : application, transport, réseau, liaison de données et physique.

Trois plans de gestion viennent compléter cette structure : le plan de gestion des tâches, qui assure une bonne répartition des fonctions entre les nœuds ; le plan de gestion de la mobilité, qui maintient les informations relatives à leur position pendant le routage ; et le plan de gestion de l'énergie, visant à réduire la consommation énergétique.

L'approche en couches consiste à diviser le système en plusieurs niveaux d'abstraction. Chaque couche communique avec les couches voisines et fournit des services à la couche supérieure [13].

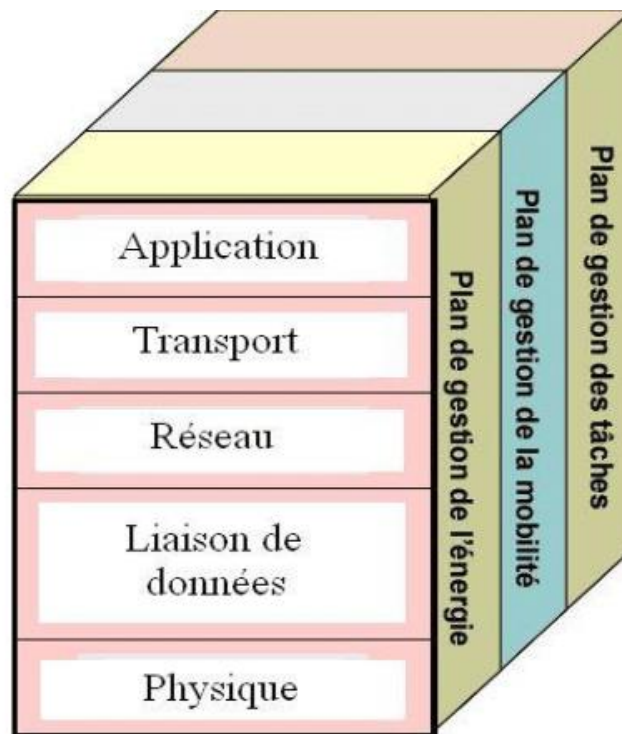


Figure 1.10 : La pile Protocolaire dans Les RCSF

La figure 1.10 illustre la pile protocolaire utilisée dans les RCSF.

1.6.3.1 La couche physique :

La couche physique est responsable de l'établissement et de la gestion des connexions entre les différents dispositifs ainsi que du support de communication utilisé. Elle assure plusieurs fonctions essentielles telles que le choix de la fréquence de transmission, la génération de la fréquence porteuse, la détection du signal et les techniques de modulation permettant la transmission des données. Par ailleurs, cette couche définit également les caractéristiques matérielles du réseau, notamment les types de connecteurs et de câbles compatibles avec le support de communication [13].

1.6.3.2 La couche liaison de données :

Cette couche définit les mécanismes de transmission des données entre deux nœuds ou routeurs situés à une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des flux, du contrôle et de la détection des erreurs, ainsi que de la gestion de l'accès au médium de

transmission. Elle assure également les communications point à point et multipoint au sein du réseau [13].

1.6.3.3 La couche réseau :

Dans la couche réseau, l'objectif principal est d'assurer le routage des données collectées par les nœuds capteurs vers la station de base (sink), tout en garantissant une transmission fiable et en optimisant la consommation énergétique.

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil se distingue de celui des réseaux ad hoc classiques par plusieurs caractéristiques :

- L'établissement d'un adressage global est difficile en raison du nombre élevé de nœuds déployés.
- Les applications exigent généralement l'acheminement de donnée provenant de sources multiples vers un puits unique.
- Plusieurs capteurs situés à proximité d'un même phénomène peuvent générer des données identiques, entraînant une redondance d'information.
- Les ressources limitées des nœuds capteurs imposent une gestion rigoureuse de l'énergie et des capacités de traitement.

En raison de ces spécificités, de nombreux algorithmes de routage adaptés aux contraintes des réseaux de capteurs ont été développés [13].

1.6.3.4 La couche transport :

La couche transport a pour rôle d'assurer la communication entre les différentes entités du réseau et de fournir des services fiables aux couches supérieures de la pile protocolaire. Elle permet ainsi d'établir des communications transparentes et efficaces entre les utilisateurs finaux.

Il existe plusieurs types de protocoles utilisés au niveau de cette couche. Parmi les plus connus, on distingue le **Transmission Control Protocol (TCP)** et le **User Datagram Protocol (UDP)**. Les protocoles orientés connexion, comme TCP, garantissent une transmission fiable des données grâce à des mécanismes de contrôle des erreurs, de gestion de la transmission et de contrôle du débit. À l'inverse, les protocoles sans connexion, tels

que UDP, offrent un service plus simple et plus rapide, mais avec un niveau de fiabilité plus limité et une gestion des erreurs minimale [12].

1.6.3.5 La couche application :

La couche application constitue le niveau le plus proche de l'utilisateur dans l'architecture du réseau. Elle fournit les services nécessaires aux applications permettant aux utilisateurs d'accéder aux données et d'interagir avec le système. Plusieurs protocoles fonctionnent à ce niveau, tels que Telnet, le protocole de transfert hypertexte (HTTP), le protocole de transfert de fichiers (FTP) ainsi que le protocole de transfert de courrier électronique (SMTP).

Dans le cas des réseaux de capteurs sans fil (WSN), la couche application joue un rôle important dans l'exploitation des données collectées par les capteurs. Elle assure notamment le traitement, le chiffrement, le formatage et le stockage des informations détectées. En outre, cette couche peut également interagir avec les couches inférieures afin de vérifier la disponibilité des ressources et des services réseau nécessaires pour satisfaire les requêtes des utilisateurs [12].

1.6.3.6 Le niveau de gestion d'énergie :

Le niveau de gestion d'énergie est responsable du contrôle et de l'optimisation de la consommation énergétique des nœuds capteurs. Par exemple, un capteur peut désactiver son interface de réception après avoir reçu un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception de messages redondants. De plus, lorsqu'un nœud détecte que son niveau d'énergie devient faible, il peut informer les autres nœuds du réseau afin de ne plus participer aux opérations de routage. Ainsi, l'énergie restante est conservée pour les fonctions essentielles de capture des données [1].

1.6.3.7 Le niveau de gestion de mobilité :

Le niveau de gestion de mobilité a pour rôle de détecter et de suivre les déplacements des nœuds capteurs dans le réseau. Cette gestion permet de maintenir en permanence une route de communication vers l'utilisateur final. Elle contribue également à mettre à jour les informations concernant les nœuds voisins, ce qui facilite la répartition équilibrée des tâches et l'optimisation de la consommation d'énergie [1].

1.6.3.8 Le niveau de gestion des tâches :

Lors des opérations de collecte de données dans une zone donnée, les nœuds capteurs ne fonctionnent pas nécessairement au même rythme. Cette différence dépend notamment du type de capteur, de son niveau d'énergie et de la zone dans laquelle il est déployé. Le niveau de gestion des tâches permet donc de répartir et d'équilibrer les tâches entre les différents nœuds du réseau afin d'assurer une coopération efficace, tout en optimisant la consommation d'énergie et en prolongeant la durée de vie du réseau [1].

1.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales liées aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Nous avons commencé par un aperçu historique de leur évolution, puis nous avons défini leur relation avec les réseaux ad hoc. Ensuite, nous avons décrit l'architecture générale des RCSF, en détaillant les différents composants tels que les capteurs, les agrégateurs, les puits et les passerelles, ainsi que leur organisation en réseau.

Nous avons également abordé les principaux domaines d'application des RCSF, notamment dans les secteurs militaire, environnemental, médical, économique ainsi que dans la surveillance et la sécurité, ce qui montre leur importance et leur large utilisation dans différents contextes. Par la suite, nous avons étudié l'architecture des nœuds capteurs ainsi que la pile protocolaire, en expliquant les différentes couches (physique, liaison de données, réseau, transport et application) et les niveaux de gestion (énergie, mobilité et tâches), qui jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement du réseau.

Enfin, ce chapitre nous permet de comprendre les notions fondamentales des capteurs, sans aborder leur architecture, leurs caractéristiques techniques ni leurs domaines d'application. Nous présentons également les principes liés à ces dispositifs, notamment le système énergétique et l'organisation des communications. Dans un environnement clos, nous devons tous nous familiariser avec les protocoles MAC et les protocoles d'utilisation des routeurs au sein du RCSF, grâce à une interface détaillée pour les archives de routeurs de base en cluster.

Chapitre 2

Les protocoles de routage dans les RCSF

2.1 Introduction :

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la communication entre les nœuds constitue l'un des éléments les plus critiques pour assurer le bon fonctionnement du réseau. En raison des ressources limitées des nœuds capteurs, notamment en énergie, en mémoire et en capacité de traitement, la conception des protocoles de communication doit être optimisée afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Parmi ces protocoles, les protocoles de routage et les protocoles d'accès au médium jouent un rôle fondamental. Les protocoles de routage, situés au niveau de la couche réseau, sont responsables de la détermination des chemins permettant d'acheminer les données depuis les nœuds capteurs vers le nœud puits. En revanche, les protocoles MAC (Medium Access Control), appartenant à la couche liaison de données, gèrent l'accès des nœuds au canal de communication afin d'éviter les collisions et de réduire la consommation d'énergie.

Ainsi, l'efficacité globale d'un réseau de capteurs sans fil dépend fortement de l'interaction et de la coordination entre les protocoles de routage et les protocoles MAC [14].

2.2 Définition des protocoles MAC (Medium Access Control Protocoles) :

Les protocoles MAC (Medium Access Control) sont un ensemble de règles qui régissent le partage et l'accès à un support de communication commun au sein d'un réseau. Leur objectif principal est d'éviter les collisions, de coordonner les transmissions et d'optimiser le débit et l'équité lorsque plusieurs appareils tentent d'envoyer des données sur le même canal. Les protocoles MAC fonctionnent au niveau de la couche liaison de données (couche 2) du modèle OSI [15].

2.2.1 Types de protocoles MAC :

Il existe plusieurs types comme suit ;

2.2.1.1 Protocoles MAC à contention :

Les protocoles MAC à contention permettent aux périphériques de se disputer l'accès au support de transmission partagé. Ils transmettent lorsqu'ils détectent que le

canal est libre ; en cas de collision, ils utilisent une procédure de temporisation avant de réessayer par exemple le CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Détection) utilisé dans l'Ethernet traditionnel sa Fonctionnement est écoute préalable, transmission si le canal est libre, et temporisation s'il est occupé [16].

2.2.1.2 Protocoles MAC planifiés (ou déterministes) :

Les protocoles MAC planifiés attribuent des créneaux horaires ou des ressources spécifiques à chaque périphérique afin de garantir un accès ordonné et prévisible. Il n'y a pas de collisions car un seul périphérique transmet dans le créneau qui lui est attribué par exemple Accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) et ça Fonctionne en divisant le temps en créneaux et en les allouant aux nœuds.

2.2.1.3 Protocoles MAC à jeton :

Les protocoles MAC à jeton font circuler un paquet de contrôle spécial, appelé jeton, entre les périphériques. Seul le périphérique possédant le jeton peut transmettre, ce qui évite les collisions et garantit l'équité par exemple le réseaux Token Ring de la Fonctionnement : le jeton circule en anneau logique, chaque périphérique pouvant ainsi transmettre à son tour [17].

2.3 Définition des protocoles de routage dans les RCSF :

Le routage est l'élément primordial d'un réseau ad hoc. Généralement, le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Dans les réseaux ad hoc il n'existe aucune infrastructure fixe ou élément central qui peut gérer le routage. Chaque nœud doit donc participer à un protocole de routage qui lui permet de découvrir les chemins existants afin de communiquer avec les autres nœuds du réseau [18].

Le protocole de routage consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, la connexion entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau. Cette stratégie doit prendre en considération certaines caractéristiques (les changements de la topologie du réseau, la bande passante, le nombre de liens et la limitation d'énergie, etc.) [19].

Le but principal des protocoles de routage est l'établissement et la maintenance des routes optimales correctes et efficaces, pour que les messages soient correctement délivrés à leurs destinations dans le réseau [20].

2.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSF :

Les protocoles de routage dans les réseaux peuvent être classés selon deux concepts :

2.4.1 Le type de protocole :

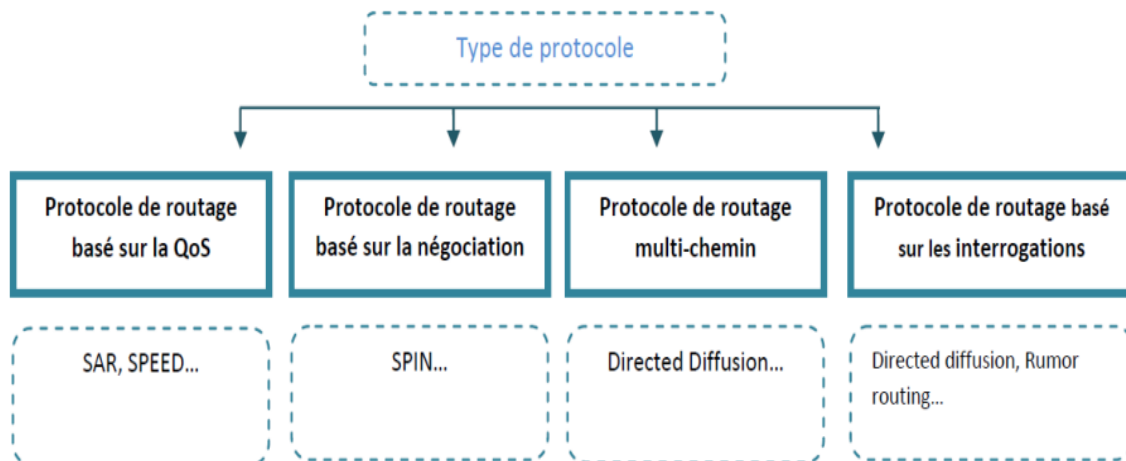


Figure2.1 : Protocoles de routage pour les RCSF selon le type de protocole.

La figure 2.1 présente une classification des protocoles de routage selon le type de protocole utilisé.

2.4.1.1 Protocole de routage basé sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud « Sink ».

2.4.1.2 Protocole de routage basé sur la QoS :

Ce type de protocoles tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous citons : le délai de bout en bout, la gigue, PDR (Paquet Delivery Ratio), énergie consommée.

2.4.1.3 Protocole de routage multi-chemin :

Il se base sur l'adoption de plus qu'un chemin menant vers la destination, et ce, pour avoir des chemins de secours si jamais le chemin principal serait rompu.

2.4.1.4 Protocole de routage basé sur la négociation des données :

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés META-DATA. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre [21]. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

2.4.2 La structure du réseau :

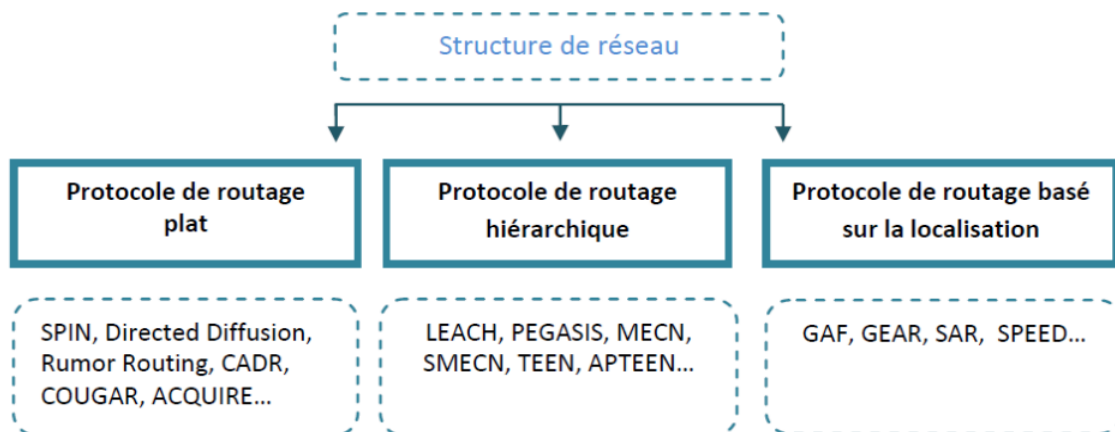


Figure 2.2 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau.

La figure 2.2 illustre la classification des protocoles de routage selon la structure du réseau.

2.4.2.1 Les protocoles de routage plat (flat based-routing) :

Ces protocoles considèrent que tous les nœuds sont identiques, c'est à dire ont les mêmes fonctions à exécuter sauf le nœud de contrôle (sink) qui est chargé de collecter toutes les informations issues des différents nœuds capteurs pour les transmettre vers l'utilisateur final. La décision d'un nœud de router des paquets vers un autre dépendra de sa position et pourra être remise en cause au cours du temps.

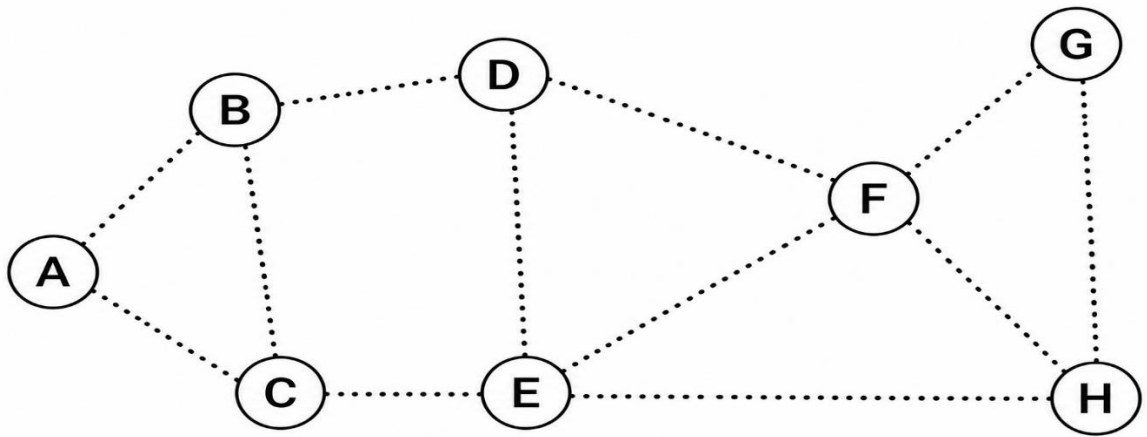


Figure2.3 : exemple du protocole de routage plat

La figure 2.3 illustre un exemple de protocole de routage plat.

2.4.2.2 Les protocoles de routage avec localisation géographique

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds [22]. Les prés-requis pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc sont :

- Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS (Global Position System), soit un système logiciel comme un protocole de localisation.
- Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation doit être utilisé.

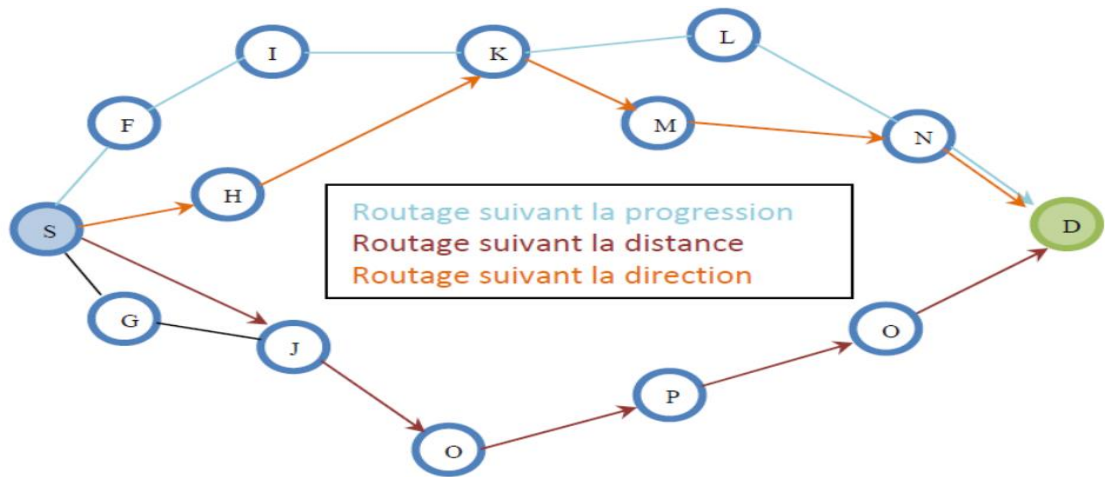


Figure 2.4 : Exemple de protocoles de routage basés sur la localisation géographique.

La figure 2.4 illustre un exemple de protocoles de routage basés sur la localisation géographique, où les données sont transmises vers la destination selon différents critères tels que la progression, la distance et la direction.

2.4.2.3 Les protocoles de routage hiérarchique :

Ces protocoles fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds du réseau. Certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Un nœud peut être, par exemple, une passerelle pour un ensemble de nœuds. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination qui lui est directement attaché.

Le principe des protocoles de routage hiérarchique est basé essentiellement sur les nœuds passerelles. En fait, les nœuds ordinaires savent que si le destinataire n'est pas dans leur voisinage direct, il suffit d'envoyer la requête à la passerelle qui la prendra en charge. À son tour, elle transmettra cette requête vers le nœud ciblé. Ce type de routage présente de nombreux avantages pour les réseaux dont leurs nœuds sont sédentaires et disposent de suffisamment d'énergie.

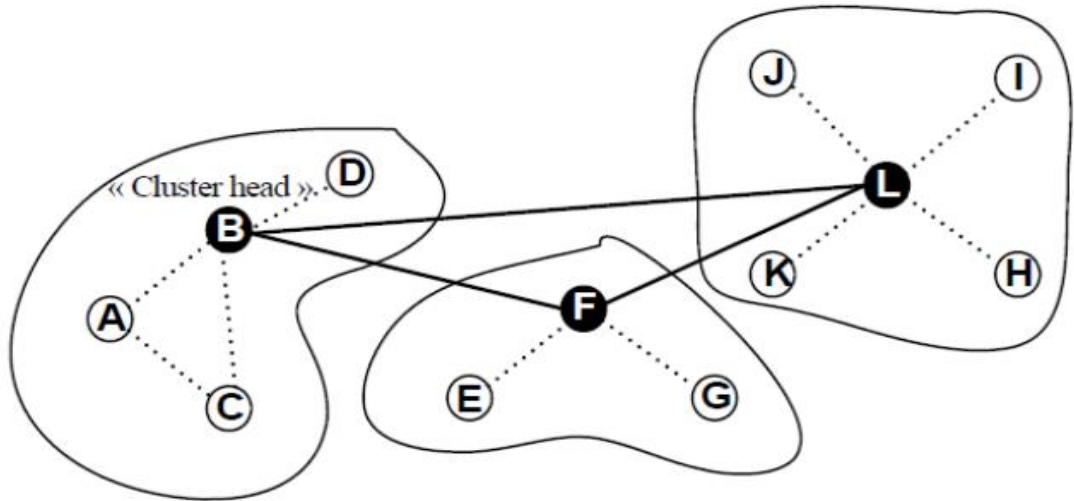


Figure 2.5 : exemple d'un protocole hiérarchique

La figure 2.5 illustre le principe du routage hiérarchique basé sur le clustering dans les réseaux WSN.

2.5 Exemples de protocoles de routage hiérarchiques :

2.5.1 Le protocole LEACH :

Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) a été introduit en 2000 par W. Heinzelman, A. Chandrakasan et H. Balakrishnan. Il constitue l'un des protocoles les plus influents dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil [23].

LEACH repose sur une architecture hiérarchique dans laquelle le réseau est divisé en clusters. Chaque cluster est géré par un Cluster-Head (CH), responsable de la collecte, de l'agrégation et de la transmission des données vers la station de base.

Le protocole fonctionne par rounds, chaque round étant composé de deux phases : une phase de configuration (setup phase) durant laquelle les clusters sont formés et les CHs sont sélectionnés de manière probabiliste, et une phase de transmission (steady-state phase) durant laquelle les données sont collectées et transmises. Le rôle de CH est tournant afin de répartir équitablement la consommation énergétique entre les nœuds. LEACH permet de réduire significativement le nombre de transmissions directes vers la station de base, ce qui améliore l'efficacité énergétique. Cependant, il présente des limites dans les réseaux de grande taille en raison de la communication directe entre CH et station de base.

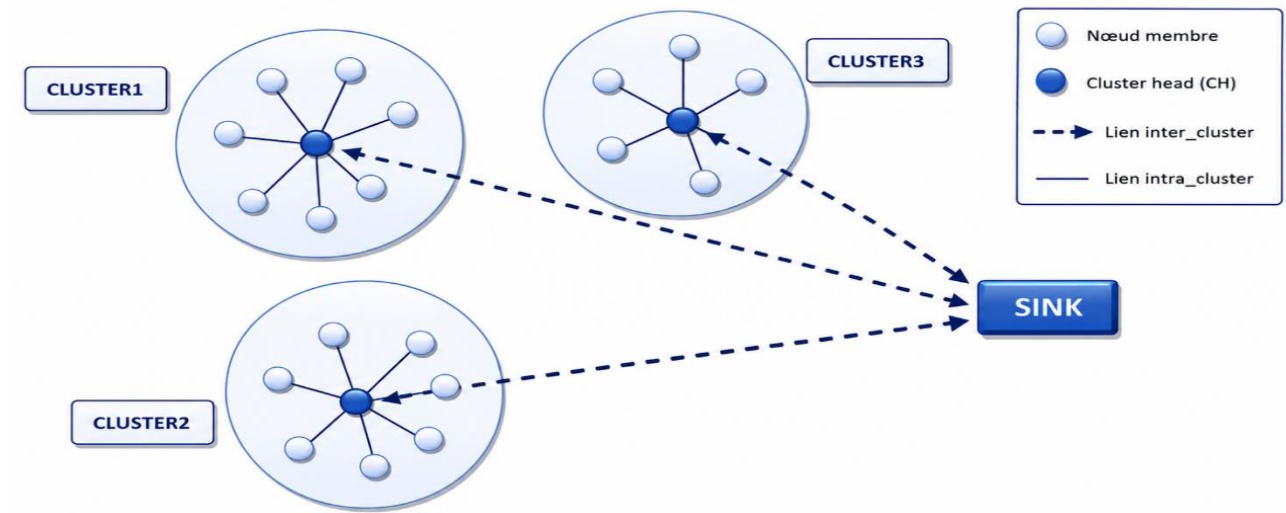


Figure 2.6 : Le principe du protocole LEACH

La figure 2.7 illustre le principe de fonctionnement du protocole LEACH basé sur l'organisation du réseau en clusters et la transmission des données des nœuds membres vers le sink à travers les Cluster Heads.

2.5.2 Le protocole PEGASIS :

Le protocole PEGASIS a été proposé en 2002 par S. Lindsey et C. Raghavendra comme une amélioration du protocole LEACH. Contrairement à ce dernier, PEGASIS organise les nœuds en une chaîne, où chaque nœud communique uniquement avec son voisin le plus proche. Les données sont transmises le long de cette chaîne et agrégées progressivement jusqu'à atteindre un nœud leader.

Le leader, qui change périodiquement, est responsable de l'envoi des données agrégées vers la station de base. Cette approche permet de réduire le nombre de transmissions longues distances et d'équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds. Les performances de PEGASIS sont supérieures à celles de LEACH en termes d'efficacité énergétique, avec des gains significatifs observés dans les simulations. Cependant, ce protocole introduit un délai de transmission plus élevé et peut souffrir de problèmes liés à la dépendance à un leader unique [24].

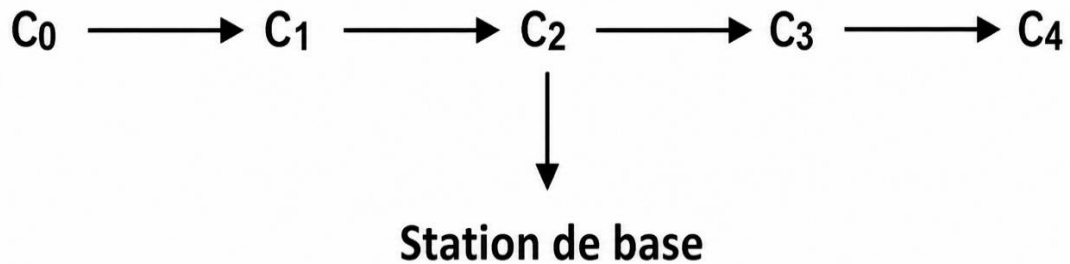


Figure 2.7 : Chaînage dans PEGASIS

La figure 2.8 montre le principe de chaînage dans le protocole PEGASIS, où les nœuds transmettent les données de manière successive le long de la chaîne jusqu'à la station de base.

2.5.3 Le protocole TEEN :

Le protocole TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network) a été proposé en 2001 par A. Manjeshwar et D. P. Agrawal. Il s'agit d'un protocole hiérarchique conçu pour les applications critiques nécessitant une réponse rapide aux changements soudains de l'environnement. TEEN introduit le concept de seuils pour contrôler les transmissions de données.

Après la formation des clusters, les Cluster-Heads diffusent deux types de seuils aux nœuds : le seuil dur (Hard Threshold), qui représente la valeur minimale déclenchant la transmission, et le seuil souple (Soft Threshold), qui détermine la variation minimale nécessaire pour transmettre de nouvelles données. Ce mécanisme permet de réduire considérablement le nombre de transmissions, ce qui économise l'énergie. Cependant, TEEN n'est pas adapté aux applications nécessitant des rapports périodiques, car aucune donnée n'est envoyée si les seuils ne sont pas atteints [25].

2.5.4 Le protocole APTEEN :

Le protocole APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network) a été proposé en 2002 par A. Manjeshwar et D. P. Agrawal comme une extension du protocole TEEN. Il combine les avantages des approches réactives et

proactives en permettant à la fois des transmissions périodiques et basées sur des événements.

Dans APTEEN, les Cluster-Heads diffusent non seulement les seuils (Hard et Soft), mais aussi les paramètres de configuration tels que les périodes de transmission et les types de requêtes supportées. Ce protocole permet de répondre à différents besoins applicatifs grâce à la prise en charge de requêtes historiques, instantanées et persistantes. Bien qu'il améliore la flexibilité et les performances globales par rapport à TEEN et LEACH, APTEEN introduit une complexité supplémentaire liée à la gestion des paramètres et à la formation des clusters [26].

2.5.5 Le protocole DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) :

DEEC est un protocole hiérarchique de clustering conçu pour les réseaux de capteurs sans fil hétérogènes Wireless Sensor Networks. Il constitue une amélioration de LEACH et vise principalement à optimiser la durée de vie du réseau en tenant compte des différences d'énergie entre les nœuds.

Dans DEEC, l'élection des Cluster Heads (CH) est basée sur une approche probabiliste qui dépend du rapport entre l'énergie résiduelle de chaque nœud et l'énergie moyenne estimée du réseau. Ainsi, les nœuds qui disposent de plus d'énergie (initiale ou restante) ont une plus grande probabilité d'être sélectionnés comme CH, tandis que les nœuds à faible énergie sont moins sollicités.

Le protocole adapte également le rôle des nœuds dans le temps : chaque nœud ne devient pas CH à la même fréquence, car la rotation des rôles dépend directement de son niveau énergétique. Cette stratégie permet d'équilibrer la consommation d'énergie dans tout le réseau.

DEEC est particulièrement efficace dans les environnements hétérogènes (multi-niveaux), où les nœuds n'ont pas tous la même énergie initiale. Les simulations montrent qu'il améliore significativement la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles classiques de clustering [27].

2.5.6 Le protocole NEEC (Novel Energy Efficient Clustering) :

NEEC (Novel Energy Efficient Clustering) est un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil à récupération d'énergie (RCSF-RE) qui vise à maximiser la

durée de vie du réseau et son efficacité énergétique en exploitant l'énergie récupérée de l'environnement. Il combine des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue et les algorithmes génétiques. Son fonctionnement se déroule en deux phases principales : une phase de configuration et une phase de transmission des données. Lors de la phase de configuration, un algorithme génétique forme de manière distribuée les clusters en minimisant la distance entre les nœuds et les chefs de cluster tout en maximisant leur durée de vie énergétique, à l'aide d'une fonction de fitness multi-objectifs basée sur des critères comme la distance, l'énergie résiduelle et la taille des clusters. Les meilleurs chefs de cluster sont alors sélectionnés selon leur valeur de fitness. Pendant la phase de transmission, les nœuds membres envoient leurs données aux chefs selon un ordonnancement TDMA, qui les agrègent avant de les transmettre au puits (SB), avec une mise à jour de l'énergie résiduelle après chaque tour [28].

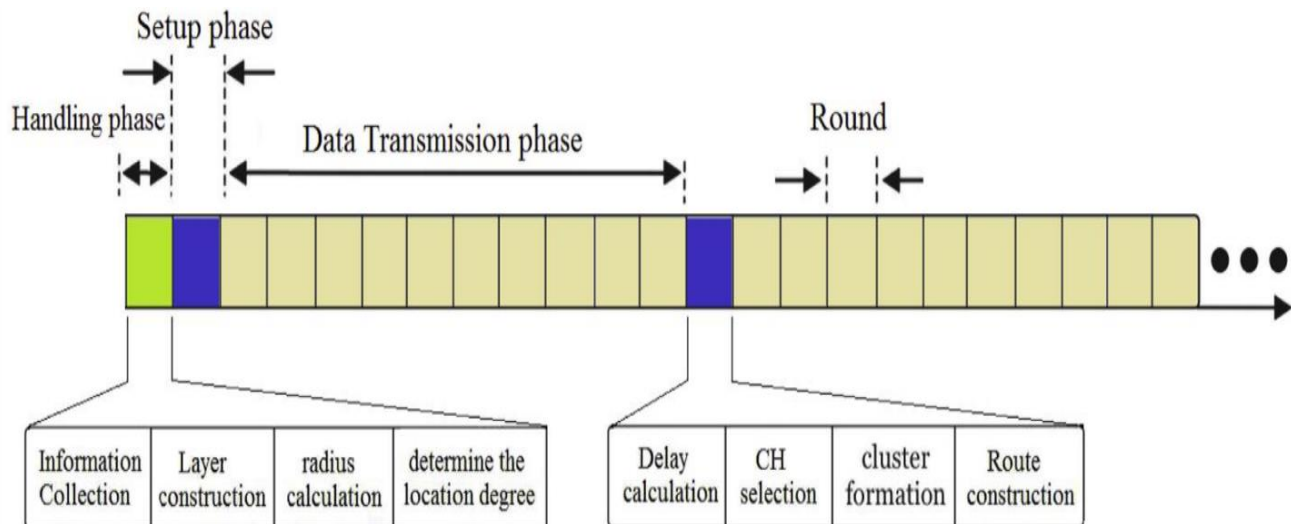


Figure 2.8 : Le schéma fonctionnel de l'algorithme NEEC

À travers l'étude des différents protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil, nous avons constaté que chaque protocole propose une approche différente pour réduire la consommation énergétique et améliorer les performances du réseau. Certains protocoles sont basés sur la négociation des données, d'autres sur le clustering, les seuils ou encore la localisation géographique. Cependant, chaque protocole présente des avantages et des limitations selon les besoins de l'application. Afin de mieux résumer les caractéristiques des protocoles étudiés, le tableau suivant présente une comparaison selon plusieurs critères.

Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif de quelques protocoles de routage.

Protocole	Année	Type	Principe	Avantages	Inconvénients
LEACH	2000	Hiérarchique (cluster)	Formation de clusters avec CH rotatif	Bonne répartition d'énergie, simple	Non adapté aux grands Réseaux
TEEN	2001	Hiérarchique	Transmission basée sur seuils (Hard/Soft)	Très économe, Réactif	Pas de données Périodiques
PEGASIS	2002	Chaîne	Transmission en chaîne avec leader	Très faible consommation d'énergie	Délai élevé, dépendance leader
APTEEN	2002	Hybride	Combinaison seuils + transmission périodique	Flexible, Performant	Complexité élevée
DEEC	2010	Hiérarchique (clustering hétérogène)	CH sélection basée sur le rapport énergie résiduelle / énergie moyenne du réseau	Adapté aux réseaux hétérogènes, durée de vie améliorée	Calcul complexe, dépend estimation énergie réseau
NEEC	2018	Hiérarchique optimisé	CH sélection optimisée basée sur énergie et clustering avancé	Très efficace énergétiquement, améliore durée de vie	Complexité élevée, dépend des paramètres

2.6 Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons étudié les protocoles MAC ainsi que les protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons présenté les différentes catégories de protocoles de routage selon leur mode de fonctionnement et la structure du réseau, notamment les protocoles plats, géographiques et hiérarchiques.

Nous avons également étudié plusieurs protocoles importants tels que LEACH, PEGASIS, TEEN, APTEEN, DEEC et NEEC en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs avantages ainsi que leurs limitations. Cette étude a montré que chaque protocole propose une approche différente pour optimiser la consommation énergétique et améliorer les performances du réseau selon les besoins de l'application.

Parmi les protocoles étudiés, le protocole LEACH se distingue par son approche hiérarchique basée sur le clustering et son efficacité énergétique. C'est pourquoi nous allons nous intéresser dans le chapitre suivant au protocole LEACH, à son fonctionnement fondamental ainsi qu'aux différentes améliorations proposées dans la littérature.

Enfin, l'analyse comparative des différents protocoles a permis de mettre en évidence l'importance du choix de la stratégie de communication dans l'optimisation des performances des RCSF. Les contraintes liées à la consommation énergétique, à la durée de vie du réseau et à la qualité de transmission demeurent des défis majeurs pour les concepteurs. Ainsi, de nombreuses recherches continuent d'être menées afin de proposer des solutions plus efficaces et adaptées aux exigences des applications modernes.

Chapitre 3

Le protocole de routage hiérarchique LEACH

3.1 Introduction :

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est l'un des protocoles les plus populaires pour les RCSF [29]. Son principe est de former des zones communes de calcul et de traitements en se basant sur la puissance du signal et le niveau d'énergie des nœuds capteurs. Chaque zone est dirigée par un chef de zone, jouant le rôle de routeur vers la station de base, en effectuant des traitements sur les données reçues de son cluster et leur expédition vers la prochaine destination. Ce rôle de chef de zone 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 suivie d'une phase de transmission. La phase d'initialisation consiste à élire les Clusters-Head (CHs) et définir les clusters. La phase de transmission est responsable de la transmission des données captées. Après une période de temps passée, une requête est diffusée sur le réseau par la station de base afin d'évaluer les performances des nœuds chefs de zones en termes d'énergie et procéder, le cas échéant, à son remplacement. Le protocole LEACH est conçu pour des applications time-driven et un mode de transmission proactif [29].

Le protocole LEACH est favorable en termes d'efficacité énergétique, puisqu'il permet la minimisation du nombre de messages circulant sur le réseau.

3.2 L'objectif et fonctionnement fondamental du protocole LEACH :

Le protocole de routage hiérarchique LEACH vise principalement à réduire de manière efficace la consommation d'énergie des nœuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-saut au sein d'un cluster, tout en effectuant l'agrégation et la fusion des données pour réduire le nombre de messages transmis à la destination. En général, la création de clusters repose sur la capacité d'énergie des capteurs et sur les capteurs situés à proximité du centre de cluster [29].

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

les nœuds du réseau, et se déroule en rounds. Les deux phases de chaque round sont la configuration et la transmission [30].

3.3 Les phases opérationnelles du protocole LEACH :

Le protocole LEACH s'exécute en deux phases principales : la phase de configuration des clusters, appelée « setup phase », et la phase de transmission des données, dite « steady-phase ».

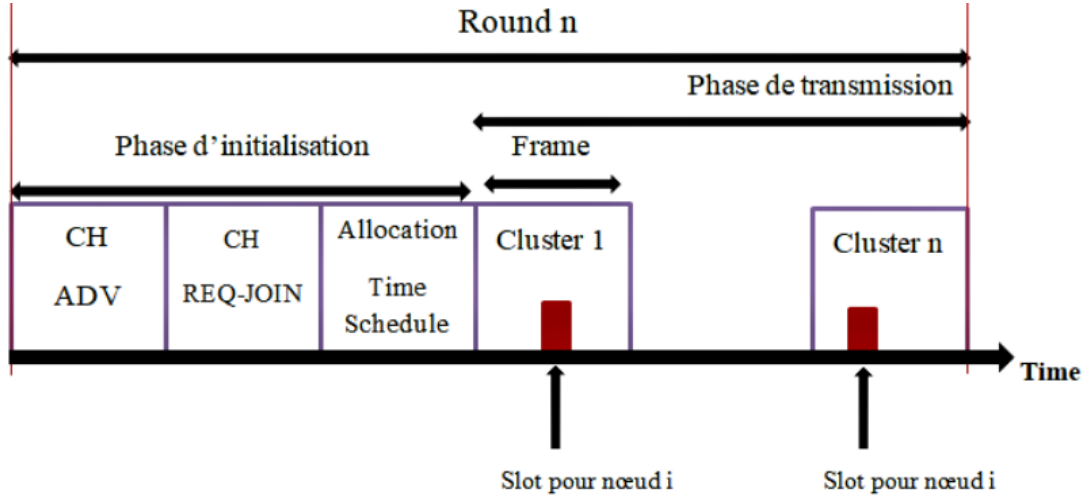


Figure 3.1 : Les phases utilisées par le protocole LEACH

La figure 3.1 illustre les phases opérationnelles du protocole LEACH.

3.3.1 La phase d'initialisation :

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

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})}, & \text{si } (n \in G) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

P : Pourcentage souhaité de nœuds **cluster-head** dans le réseau (par exemple, 5 %).

n : Identifiant d'un nœud particulier.

r : Round (cycle) en cours d'exécution du protocole.

G : Ensemble des nœuds qui **n'ont pas encore été élus** comme cluster-head lors des rounds précédents.

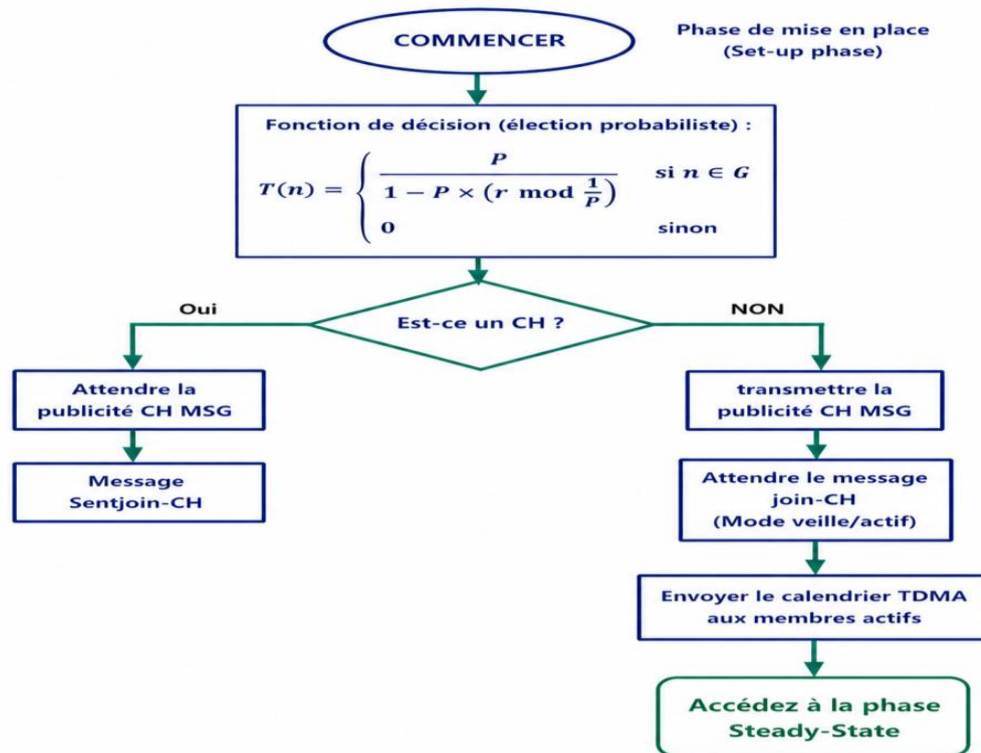


Figure 3.2 : L'organigramme de la phase d'initialisation

La figure 3.2 illustre L'organigramme de la phase d'initialisation (set-up phase) du protocole LEACH.

Dans la phase de mise en place, chaque nœud commence par échanger des informations essentielles telles que son identifiant, sa position et son niveau d'énergie. Ensuite, un mécanisme probabiliste est utilisé pour déterminer quels nœuds deviennent des cluster-heads (CH).

Les nœuds élus comme CH diffusent un message de publicité afin d'annoncer leur rôle aux autres nœuds du réseau. Ces derniers, après réception des différentes annonces, choisissent le cluster-head le plus approprié (généralement en fonction de la puissance du signal) et envoient un message d'adhésion (Join-CH).

Une fois les clusters formés, chaque CH établit un planning TDMA qu'il transmet à ses membres. Ce mécanisme permet d'organiser l'accès au canal et d'éviter les collisions, tout en réduisant la consommation énergétique.

3.3.2 La phase de transmission de données (steady state phase) :

En utilisant le Schedule TDMA, Chaque nœud membre (non-CH) dans le cluster transmet les données collectées à son CH. Et après le CH 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) [30].

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

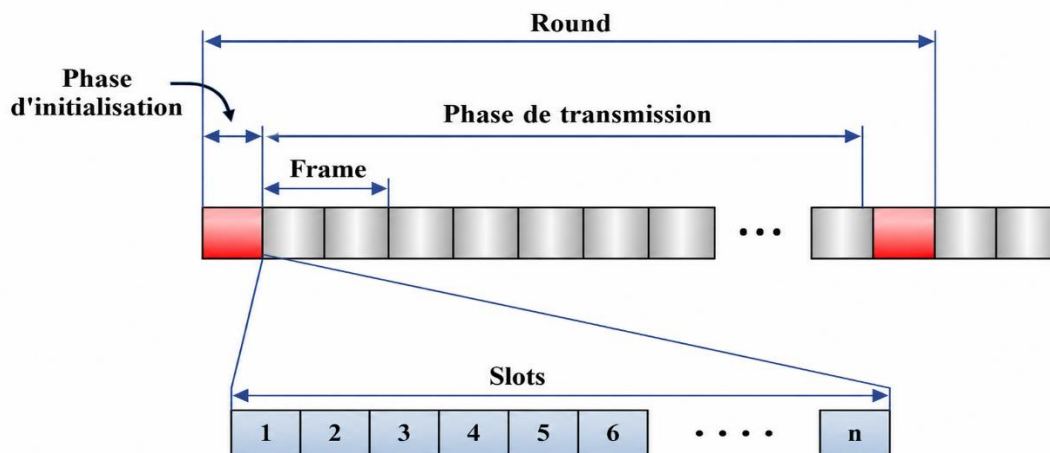


Figure 3.3 : La répartition du temps utilisée dans la phase de transmission

La figure 3.3 illustre l'organisation temporelle du protocole LEACH, structurée en rounds successifs. Chaque round est divisé en deux phases principales : une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission [33].

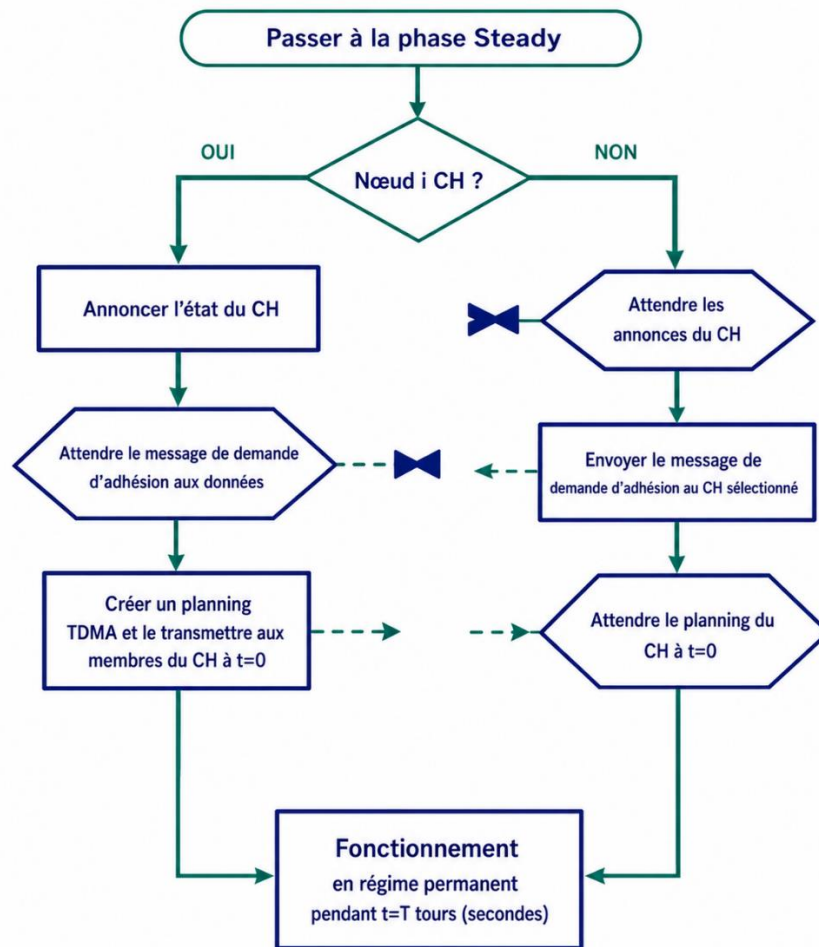


Figure 3.4: Organigramme de la phase de transmission (steady state phase)

La figure 3.4 illustre l'organigramme de la phase de transmission (Steady-State Phase) du protocole LEACH.

Dans la phase stable, le réseau entre en fonctionnement normal. Les nœuds membres transmettent leurs données au cluster-head selon les créneaux définis dans le planning TDMA. En dehors de leur temps d'émission, ils restent en mode veille afin d'économiser l'énergie.

Le cluster-head, de son côté, reçoit les données de tous les nœuds du cluster, effectue une agrégation afin de réduire la redondance, puis envoie les données consolidées vers la station de base.

Ce fonctionnement se poursuit pendant une durée déterminée (appelée round), après quoi une nouvelle phase de mise en place est lancée pour réélire les cluster-heads. Cette rotation permet de répartir la consommation d'énergie entre les nœuds et d'augmenter la durée de vie globale du réseau.

3.4 Les avantages du protocole LEACH :

- Protocole auto-organisateur basé sur le groupement adaptatif.
- Rotation des rôles de chefs de groupes.
- Faible énergie pour l'accès au média.
- Compression locale (Agrégation).
- Lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il éteint sa radio pour conserver son énergie.
- L'utilisation des techniques TDMA/CDMA permet d'avoir une hiérarchie et de réaliser des clusterings sur plusieurs niveaux [30].

3.5 Limitations de protocole LEACH :

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

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

d'émission importante des nœuds de tête de cluster est requise, donc LEACH ne s'applique pas aux réseaux à grande échelle [34].

3.6 Amélioration du protocoles LEACH :

Ce protocole a connu plusieurs évolutions au fil des ans, dont les plus importantes sont résumées ici.

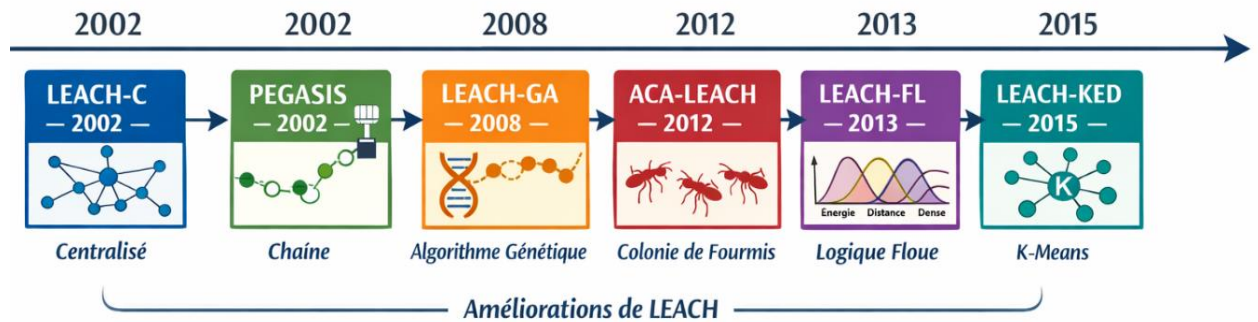


Figure 3.5: Évolution des protocoles LEACH améliorés

Cette figure met en évidence l'évolution progressive des améliorations du protocole LEACH, où chaque variante vise à optimiser certains aspects du réseau, notamment la consommation d'énergie et la durée de vie. On remarque également l'intégration de différentes techniques d'optimisation telles que les algorithmes génétiques, la logique floue et les méthodes de clustering, afin d'améliorer les performances globales du protocole.

3.6.1 Le protocole LEACH-C :

Le protocole LEACH-C (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy – Centralized) est une version améliorée du protocole LEACH, spécialement conçue pour les réseaux de capteurs sans fil.

La principale différence entre LEACH et LEACH-C réside dans la méthode de formation des clusters. En effet, LEACH utilise une approche distribuée, tandis que LEACH-C adopte une approche centralisée basée sur l'optimisation [23].

Dans LEACH-C, la station de base (Base Station – BS) joue un rôle essentiel en collectant les informations globales du réseau et en déterminant la meilleure configuration des clusters.

3.6.1.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de LEACH-C se déroule en cycles (*rounds*), chacun étant composé de deux phases principales :

3.6.1.1.1 Phase d'initialisation (Set-up Phase) :

Durant cette phase, chaque nœud envoie à la station de base :

- Sa position (souvent obtenue via GPS),
- Son niveau d'énergie résiduelle.

a) Énergie moyenne des nœuds :

Avant la sélection des Cluster Heads, la station de base calcule l'énergie moyenne du réseau :

$$E_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad (3.2)$$

Où :

E_{avg} : est l'énergie moyenne des nœuds dans le réseau.

E_i : est l'énergie résiduelle du nœud.

N : est le nombre total de nœuds.

Cette valeur est utilisée pour équilibrer la consommation d'énergie dans le réseau. Seuls les nœuds dont l'énergie est supérieure ou égale à la moyenne peuvent être sélectionnés comme Cluster Heads.

La formation des clusters est ensuite traitée comme un problème d'optimisation de type **NP-hard**, ce qui signifie qu'il n'existe pas de solution analytique simple. Pour résoudre ce problème, LEACH-C utilise l'algorithme **Simulated Annealing**, qui permet de trouver une solution quasi-optimale.

b) Détermination du nombre optimal de clusters :

Le nombre optimal de clusters est donné par la relation suivante [23] :

$$K = \sqrt{\frac{N}{2\pi} \frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \frac{M}{d_{toBS}^2} \quad (3.3)$$

Où :

N : est le nombre de nœuds,

M : représente la surface du réseau,

d_{toBS}^2 : est la distance moyenne vers la station de base,

E_{fs} et E_{mp} sont les paramètres énergétiques du modèle radio.

Cette équation permet d'estimer le nombre de clusters qui minimise la consommation d'énergie dans le réseau.

c) Fonction objectif (optimisation) :

L'objectif principal est de minimiser la distance entre les nœuds et leurs chefs de cluster :

$$f(C) = \sum_{i=1}^N \min d^2(i, c) \quad (3.4)$$

Cette fonction permet de réduire la consommation d'énergie, puisque l'énergie de transmission dépend de la distance.

d) Sélection probabiliste des Cluster Heads

L'algorithme Simulated Annealing utilise une fonction probabiliste [23] :

$$P_k = \begin{cases} e^{\frac{-(f(C1)-f(C))}{a_k}} & f(C1) \geq f(C) \\ 1 & f(C1) < f(C) \end{cases} \quad (3.5)$$

Cette probabilité permet de décider si une solution doit être acceptée ou non, afin d'éviter les minima locaux et d'atteindre une solution optimale.

P_k : est la probabilité d'accepter la nouvelle solution.

e : est la constante d'Euler (≈ 2.718).

$f(C1)$: est la valeur de la fonction objective pour la nouvelle solution.

$f(C)$: est la valeur de la fonction objective pour la solution actuelle.

$f(C1) - f(C)$: représente la différence de coût entre les deux solutions.

α_k : est le paramètre de température utilisé dans l'algorithme de recuit simulé.

e) Formation des clusters :

Une fois les Cluster Heads sélectionnés les clusters sont formés de manière à ce que les nœuds soient proches de leur CH et la station de base diffuse l'information à tous les nœuds, et chaque nœud devient CH si son identifiant correspond, sinon rejoint le cluster assigné.

3.6.1.1.2 Phase de transmission (Steady-State Phase) :

Cette phase est identique à celle du protocole LEACH :

Les nœuds transmettent leurs données au CH selon un planning TDMA.

• Le CH :

- Agrégé les données,
- Réduit la redondance,
- Envoie les données compressées à la station de base.

Cette stratégie permet de réduire le trafic réseau et la consommation énergétique globale.

3.6.2 Le protocole PEGASIS :

Le protocole **PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)** a été proposé en **2002** par **S. Lindsey et C. Raghavendra** comme une amélioration directe du protocole LEACH [24]. Contrairement à LEACH qui repose sur la formation de clusters, PEGASIS organise les nœuds en une chaîne, où chaque nœud communique uniquement avec son voisin le plus proche.

Les données sont transmises de nœud en nœud le long de la chaîne, chaque nœud effectuant une agrégation avant de transmettre les données au suivant. À chaque round, un nœud est désigné comme leader pour envoyer les données finales à la station de base. La construction de la chaîne est réalisée selon une approche gloutonne.

Cette organisation permet de réduire le nombre de transmissions longues distances et d'améliorer l'efficacité énergétique du réseau. Cependant, elle peut introduire un délai de transmission plus élevé et dépend fortement du bon fonctionnement du nœud leader.

3.6.3 Le protocole LEACH-GA :

Le protocole **LEACH-GA (GA-Based Energy-Efficient Adaptive Clustering protocol)** a été proposé vers **2008** comme une amélioration du protocole LEACH basée sur l'utilisation des algorithmes génétiques (AGs) . En plus des deux phases classiques de LEACH (setup et steady-state), LEACH-GA introduit une phase de préparation exécutée avant le premier round. Durant cette phase, chaque nœud détermine initialement s'il peut devenir Cluster-Head (CH), puis envoie à la station de base son statut, son identifiant ainsi que sa position géographique.

Une fois ces informations collectées, la station de base applique un algorithme génétique afin de déterminer la probabilité optimale de sélection des CHs, en minimisant la consommation énergétique globale du réseau lors du premier round. Ensuite, cette probabilité optimale est diffusée à tous les nœuds pour guider la formation des clusters durant la phase setup. Cette phase de préparation n'est exécutée qu'une seule fois. Les résultats de simulation montrent que LEACH-GA améliore l'efficacité énergétique et prolonge la durée de vie du réseau par rapport à LEACH, bien que sa vitesse de convergence reste relativement lente [35].

3.6.4 Le protocole ACA-LEACH :

Le protocole ACA-LEACH (Ant Colony Algorithm based LEACH) a été proposé vers 2012, et constitue une amélioration de LEACH basée sur la métaheuristique d'optimisation par colonies de fourmis (ACO). Ce protocole améliore principalement le routage inter-cluster afin de réduire la consommation d'énergie des Cluster-Heads.

Dans ACA-LEACH, l'élection des CHs dépend de leur énergie résiduelle ainsi que de la distance qui les sépare des autres nœuds. Lorsque deux CHs sont proches, le protocole sélectionne celui ayant la plus grande énergie pour assurer le rôle principal, avec un nombre réduit de nœuds membres. Par ailleurs, des agents appelés "fourmis" sont déployés au niveau de chaque CH afin d'explorer les différents chemins possibles vers la station de base. Ces chemins sont évalués en fonction de la quantité de phéromones, permettant ainsi de choisir le chemin optimal avec une consommation d'énergie minimale [36].

Les résultats de simulation ont montré que ACA-LEACH permet de réduire significativement la consommation d'énergie et d'augmenter la durée de vie du réseau par rapport à LEACH.

3.6.5 Le protocole LEACH-FL :

Le protocole LEACH-FL (Fuzzy Logic based LEACH) a été proposé vers 2013, et constitue une amélioration de LEACH basée sur la logique floue. Dans ce protocole, la sélection des CHs devient plus intelligente en intégrant plusieurs paramètres, notamment l'énergie résiduelle, la distance à la station de base et la densité des nœuds.

Le processus repose sur trois modules principaux : un module de fuzzification, un moteur d'inférence et un module de défuzzification. Ces modules permettent de calculer la probabilité pour chaque nœud de devenir CH de manière plus précise que dans LEACH classique.

Le reste du fonctionnement est similaire à LEACH. Les résultats montrent que LEACH-FL permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la durée de vie du réseau grâce à une meilleure sélection des CHs [37].

3.6.6 Le protocole LEACH-KED :

Le protocole LEACH-KED (K-Means Energy Distance) a été proposé vers 2015, et repose sur l'utilisation de l'algorithme de clustering K-Means pour améliorer la formation des clusters. Ce protocole se compose de deux phases principales : la phase de formation des clusters et la phase de transmission des données.

Dans la première phase, le nombre de clusters K est fixé à environ 5% du nombre total de nœuds. L'élection des CHs se base sur un poids combinant l'énergie résiduelle du nœud, sa distance par rapport au centroïde du cluster ainsi que sa distance à la station de base. Cette approche permet d'obtenir une meilleure répartition des clusters dans le réseau.

La seconde phase est similaire à celle de LEACH, où les nœuds transmettent leurs données aux CHs, qui les agrègent avant de les envoyer à la station de base. Les résultats de simulation indiquent que LEACH-KED améliore les performances énergétiques et surpasse LEACH classique [38].

Chapitre 3 : le protocole de routage hiérarchique LEACH

Afin de mieux comparer les différentes améliorations du protocole LEACH, le tableau suivant présente une synthèse de leurs principales caractéristiques.

Tableau 3.1 : Tableau comparatif des améliorations de LEACH

Protocole	Année	Amélioration	Principe	Avantages	Inconvénients
LEACH-C	2002	Centralisé	Sélection des CHs par la station de base	Meilleure Répartition des clusters, économie d'énergie	Surcoût de Communication
PEGASIS	2002	Chaîne	Organisation en chaîne avec un leader	Réduction des transmissions, forte économie d'énergie	Délai élevé, dépendance leader
LEACH-GA	2008	Algorithme Génétique	Optimisation des CHs via GA	Optimisation énergétique globale	Convergence lente
ACA-LEACH	2012	Colonie de fourmis (ACO)	Optimisation du routage inter-cluster	Choix optimal des chemins, durée de vie améliorée	Complexité élevée
LEACH-FL	2013	Logique Floue	Sélection intelligente des CHs	Meilleure décision, efficacité énergétique	Complexité de calcul
LEACH-KED	2015	K-Means	Clustering basé sur centroïdes	Bonne répartition des Clusters	Dépend du choix de K

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le protocole LEACH, qui est un protocole de routage hiérarchique basé sur la formation de clusters dans les réseaux de capteurs sans fil. Son fonctionnement repose sur deux phases principales : la phase d'initialisation, où les Cluster-Heads sont élus et les clusters formés, et la phase de transmission, où les données sont collectées, agrégées puis envoyées à la station de base. LEACH permet de réduire la consommation d'énergie grâce à l'agrégation des données et à la rotation des rôles entre les nœuds, mais il présente certaines limites comme la sélection aléatoire des Cluster-Heads et une répartition parfois déséquilibrée des clusters.

Nous avons également présenté les principales améliorations du protocole LEACH. LEACH-C centralise la gestion des clusters au niveau de la station de base afin d'optimiser leur formation. PEGASIS organise les nœuds en chaîne pour limiter les communications longue distance. LEACH-GA utilise les algorithmes génétiques pour améliorer la sélection des Cluster-Heads. ACA-LEACH applique les colonies de fourmis pour optimiser le routage et réduire la consommation d'énergie. LEACH-FL introduit la logique floue pour une sélection plus intelligente des Cluster-Heads en tenant compte de plusieurs paramètres. Enfin, LEACH-KED utilise l'algorithme K-Means pour améliorer la formation des clusters et la répartition des nœuds.

En conclusion, toutes ces améliorations ont pour objectif principal d'optimiser la consommation d'énergie et d'augmenter la durée de vie du réseau, en corrigeant les limites du protocole LEACH de base.

Chapitre 4

Simulation et analyse des performances des protocoles étudiés

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons évaluer les performances des protocoles LEACH, LEACH-C et du protocole proposé à l'aide de simulations réalisées sous MATLAB. L'objectif est de comparer leur comportement dans un environnement similaire afin d'identifier leurs points forts et leurs limites.

Pour cela, plusieurs paramètres de simulation ont été fixés, en tenant compte des contraintes énergétiques des réseaux de capteurs. Les résultats seront analysés à travers différentes métriques comme la consommation d'énergie, la couverture du réseau et la durée de vie.

Enfin, une analyse détaillée des résultats permettra de mieux comprendre l'impact du protocole proposé par rapport aux approches classiques.

4.2 Environnement de simulation :

4.2.1 Matériel utilisé :

Pour la réalisation des simulations, nous avons utilisé un ordinateur portable personnel présentant les caractéristiques suivantes :

- Processeur : Intel(R) i5-8365U CPU @ 1.60 GHz 1.90 GHZ
- Mémoire vive (RAM) : 8 Go
- Système d'exploitation : Microsoft Windows 11

Cette configuration est suffisante pour exécuter les simulations réalisées sous MATLAB et analyser les résultats obtenus.

4.2.2 Logiciel utilisé :

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour le développement et la simulation des protocoles étudiés. MATLAB est un environnement de calcul numérique et de programmation largement utilisé dans les domaines scientifiques et techniques. Il a été développé par la société MathWorks.

MATLAB se distingue par sa capacité à manipuler facilement des données numériques et à résoudre des problèmes mathématiques complexes grâce à un langage de programmation

de haut niveau. Sa syntaxe simple et proche du langage scientifique permet de modéliser efficacement des systèmes sans nécessiter des structures de programmation complexes.

Contrairement aux langages compilés tels que C ou C++, MATLAB ne nécessite pas de compilation préalable, ce qui facilite le développement et l'exécution des programmes. Il offre également des outils intégrés permettant de visualiser les résultats sous forme de graphes et de figures, ce qui est particulièrement utile pour l'analyse des performances des réseaux de capteurs.

Dans ce travail, cet outil a été utilisé pour implémenter les protocoles LEACH et LEACH-C et le protocole proposé, ainsi que pour tracer les différentes courbes de performance.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB, version R2017b (9.3.0.713579), qui constitue un environnement efficace pour la modélisation et l'analyse des réseaux de capteurs sans fil.

Afin d'illustrer l'environnement de développement utilisé, la figure suivante présente l'éditeur MATLAB contenant le script de simulation.

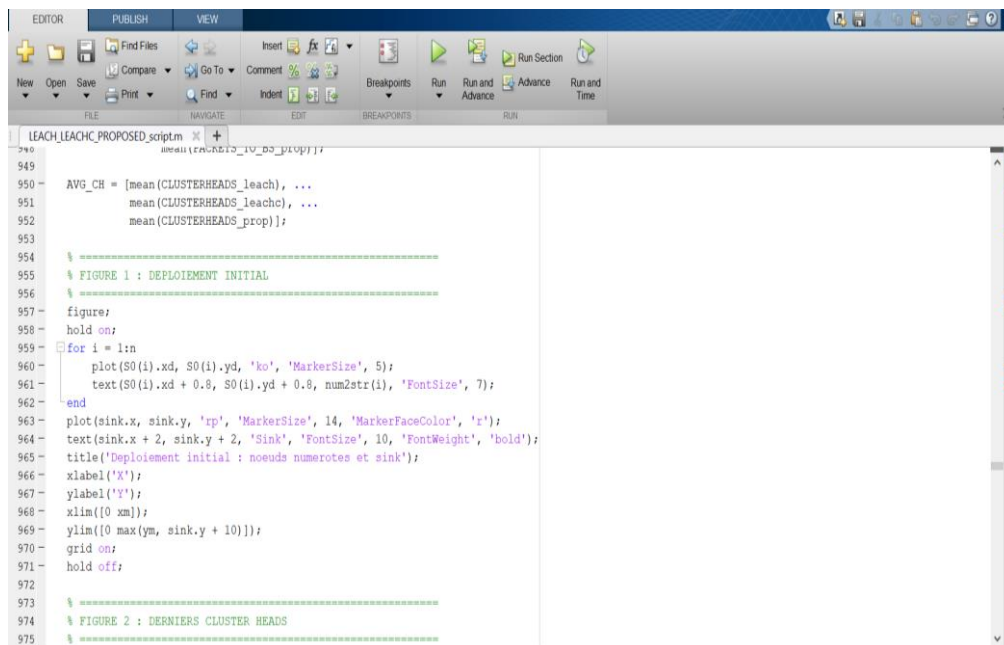


Figure 4.1 : Éditeur MATLAB utilisé pour l'implémentation du programme de simulation

4.3 Simulation :

4.3.1 Déploiement du réseau :

Le réseau est constitué de 100 nœuds capteurs déployés de manière aléatoire dans une zone de 100 m × 100 m. Une station de base (sink) est positionnée à l'extérieur de la zone de déploiement afin de simuler un scénario réaliste de communication longue distance.

Chaque nœud est initialisé avec une énergie identique, et sa position est générée aléatoirement. Cette configuration permet d'étudier le comportement des protocoles dans un environnement non structuré.

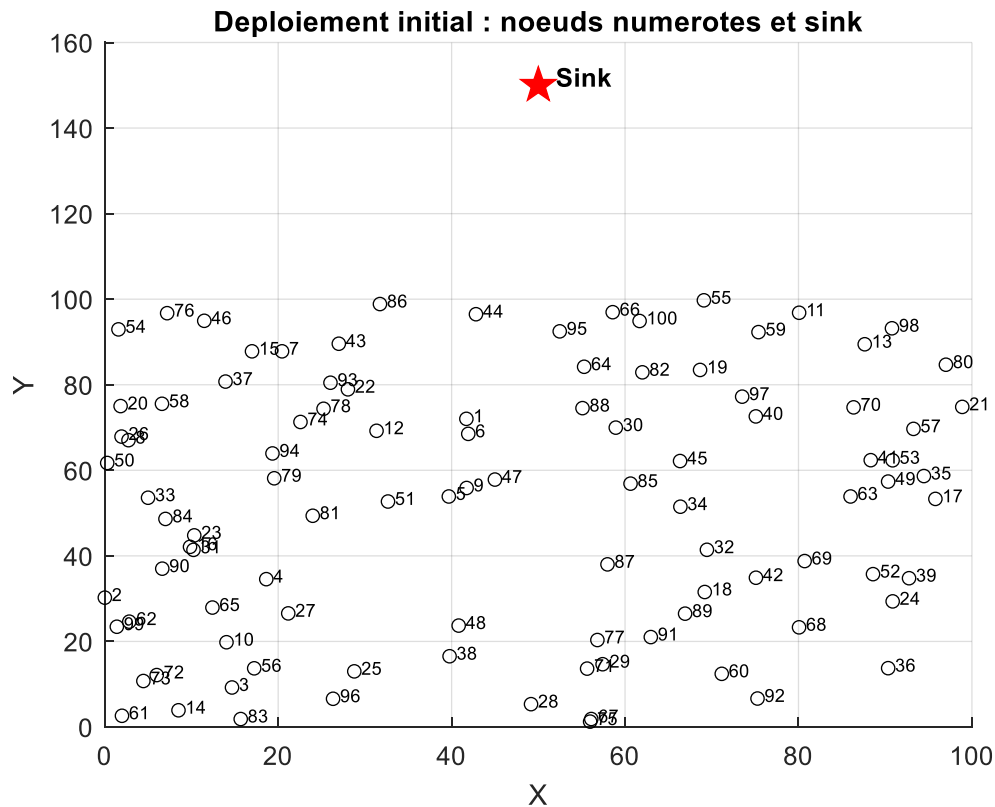


Figure 4.2 : Déploiement initial des nœuds

La figure 4.2 présente le déploiement aléatoire des nœuds dans la zone de simulation. Le sink est positionné à l'extérieur de la zone, ce qui permet de représenter un scénario réaliste de communication. Cette distribution influence directement la formation des clusters et la consommation d'énergie. Elle constitue ainsi une base importante pour l'évaluation des performances des protocoles étudiés.

Après avoir présenté le déploiement initial du réseau, nous analysons dans la suite l'évolution des performances des protocoles à travers différentes métriques.

4.3.2 Fonctionnement de la simulation :

La simulation est exécutée sur un nombre maximal de 1500 rounds. À chaque round, les opérations suivantes sont réalisées :

- Sélection des Cluster Heads selon le protocole utilisé
- Formation des clusters
- Transmission des données des nœuds vers les Cluster Heads
- Agrégation des données au niveau des Cluster Heads
- Transmission des données vers le sink
- Mise à jour de l'énergie des nœuds

Au cours de la simulation, plusieurs paramètres sont enregistrés, notamment l'énergie résiduelle, le nombre de nœuds vivants, la couverture du réseau et le nombre de Cluster Heads.

Dans cette simulation, la consommation d'énergie est basée sur le modèle radio classique. L'énergie consommée pour la transmission et la réception des données est donnée par les équations suivantes :

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} kE_{elect} + kE_{fs}d^2 & d < d_0 \\ kE_{elect} + kE_{mp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$E_{RX}(k) = kE_{elect} \quad (4.2)$$

$$d_0 = \sqrt{(E_{fs}/E_{mp})} \quad (4.3)$$

E_{TX} : est la consommation d'énergie de l'émetteur qui envoie un message de kbits au récepteur.

E_{RX} : est la consommée d'énergie du récepteur qui reçoit un k-message de bit.

E_{elect} : est la consommation d'énergie du circuit d'émission-réception sans fil.

k : taille de message qui contient le nombre de bits envoyés.

d : la distance mesurée entre la source et la destination.

d_0 : la distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.

E_{fs} : facteur d'amplification dans l'espace libre.

E_{mp} : facteur d'amplification dans l'espace multi-chemins.

$$Couverture(r) = (N_couverts(r) / N_total) \times 100 \quad (4.4)$$

Où $Ncouverts(r)$ représente le nombre de points couverts au round r , et $Ntotal$ le nombre total de points de la grille.

Afin de compléter le modèle de simulation, les principaux paramètres utilisés sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4.1 : Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Nombre de nœuds (n)	100
Dimension du réseau	100 m $\times$ 100 m
Position du sink (x, y)	(50, 150)
Nombre du rounds	1500
Energie initiale (E_0)	0.5 joule
Probabilité de CH (P)	0.1
Energie d'émission (E_{TX})	50 nJ/bit
Energie de réception (E_{RX})	50 nJ/bit
Amplification free space (E_{fs})	10 pJ/bit/m ²
Amplification multipath (E_{mp})	0.0013 pJ/bit/m ⁴
Energie d'agrégation (E_{DA})	5 nJ/bit
Taille du paquet	4000 bits
Distance seuil (d_0)	$\sqrt{(E_{fs}/E_{mp})}$
Rayon de détection (R_s)	12 m
Pas de grille	5 m

Poids de l'énergie résiduelle (w_E)	0.5
Poids de la distance au sink (w_D)	0.2
Poids de la densité locale (w_N)	0.3

4.4 Présentation des protocoles étudiés :

Dans cette section, nous présentons les principaux protocoles utilisés dans cette étude, à savoir LEACH, LEACH-C ainsi que le protocole proposé. Cette présentation permet de mieux comprendre les différences entre les approches étudiées avant l'analyse des résultats de simulation.

4.4.1 Le Protocole LEACH :

Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole hiérarchique basé sur la formation de clusters. Dans ce protocole, les Cluster Heads sont sélectionnés de manière aléatoire avec une certaine probabilité.

Chaque nœud a la possibilité de devenir CH, ce qui permet une rotation des rôles. Cependant, cette approche aléatoire peut entraîner une mauvaise répartition des Cluster Heads et une consommation énergétique non équilibrée.

4.4.2 Le Protocole LEACH-C :

LEACH-C est une version améliorée de LEACH basée sur une approche centralisée. Dans ce cas, la station de base (sink) collecte les informations des nœuds et sélectionne les Cluster Heads en fonction de leur énergie résiduelle et de leur position.

Cette méthode permet une meilleure distribution des Cluster Heads dans le réseau, mais elle reste limitée car elle se base principalement sur un nombre réduit de critères.

4.4.3 Le Protocole proposé (LEACH-EDD-Score) :

Dans ce travail, nous proposons un protocole amélioré basé sur LEACH, appelé LEACH-EDD-Score (Energy–Distance–Density Score). Cette approche constitue une contribution personnelle dans le cadre de cette étude.

À notre connaissance, cette combinaison spécifique de critères n'a pas été explicitement abordée dans les travaux étudiés.

Le protocole LEACH-EDD-Score vise à améliorer la sélection des Cluster Heads en utilisant une fonction de score basée sur trois critères principaux : l'énergie résiduelle, la distance au sink et la densité locale des nœuds.

Contrairement au protocole LEACH, qui sélectionne les Cluster Heads de manière aléatoire, et au protocole LEACH-C, qui adopte une sélection centralisée principalement basée sur l'énergie et la position des nœuds, le protocole proposé combine plusieurs paramètres afin de choisir les nœuds les plus adaptés pour devenir Cluster Heads.

L'objectif principal de cette approche est d'améliorer la répartition des Cluster Heads, de réduire la consommation énergétique, d'améliorer la couverture du réseau et de prolonger la durée de vie globale du réseau.

4.4.3.1 Critères utilisés :

Le protocole proposé repose sur trois critères essentiels :

a) Énergie résiduelle :

L'énergie résiduelle représente l'énergie restante au niveau de chaque nœud. Un nœud possédant une énergie élevée est plus apte à devenir Cluster Head, car ce rôle nécessite plus d'énergie pour recevoir, agréger et transmettre les données.

b) Distance au sink :

La distance entre le nœud et le sink est également prise en compte. Un nœud plus proche du sink consomme généralement moins d'énergie lors de la transmission des données.

c) Densité locale :

La densité locale correspond au nombre de voisins autour d'un nœud. Un nœud situé dans une zone dense peut mieux représenter son voisinage et former un cluster plus efficace.

Dans cette étude, les coefficients de pondération ont été choisis en fonction de l'importance relative de chaque critère dans la performance du réseau.

L'énergie résiduelle est considérée comme le facteur le plus critique, car un Cluster Head consomme une quantité importante d'énergie. Par conséquent, elle est affectée d'un poids élevé ($w_E = 0.5$).

La densité locale est également importante, car elle permet une meilleure organisation des clusters et une réduction du nombre de Cluster Heads, ce qui améliore l'efficacité du réseau. Elle est donc mise au deuxième plan d'importance, et est attribuée un poids intermédiaire ($w_N = 0.3$).

Enfin, la distance au sink influence la consommation d'énergie lors de la transmission, mais son impact reste moins important que les deux autres critères. Elle a été attribuée un poids plus faible ($w_D = 0.2$).

4.4.3.2 Calcul du score :

Le score est une valeur qui permet de classer les nœuds selon leur capacité à devenir Cluster Head, en fonction de leur énergie, de leur position et de leur voisinage. La sélection des Cluster Heads repose sur une fonction de score définie comme suit :

$$Score_i = w_E \cdot E_{i,norm} + w_D \cdot D_{i,norm} + w_N \cdot N_{i,norm} \quad (4.5)$$

$E_{i,norm}$: représente l'énergie résiduelle normalisée du nœud (i),

$$E_{i,norm} = \frac{E_i}{E_{max}} \quad (4.6)$$

Où :

E_i : énergie résiduelle du nœud i

E_{max} : énergie maximale (souvent l'énergie initiale)

$D_{i,norm}$: représente la distance normalisée entre le nœud (i) et le sink.

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_{sink})^2 + (y_i - y_{sink})^2} \quad (4.7)$$

$$D_{i,norm} = 1 - \frac{D_i}{D_{max}} \quad (4.8)$$

Où :

D_i : distance entre le nœud et le sink

D_{max} : distance maximale dans le réseau

$N_{i,norm}$: représente la densité locale normalisée du nœud (i).

$$N_{i,norm} = \frac{N_i}{N_{max}} \quad (4.9)$$

Où :

N_i : nombre de voisins du nœud i

N_{max} : nombre maximale de voisins

W_E , W_D et W_N : représentent les poids associés à chaque critère.

Les critères utilisés sont normalisés afin d'obtenir des valeurs comprises entre 0 et 1. Cette étape est nécessaire car les critères n'ont pas les mêmes unités : l'énergie est exprimée en joules, la distance en mètres, tandis que la densité correspond à un nombre de voisins.

Ainsi, la normalisation permet de rendre les critères comparables et d'éviter qu'un paramètre domine les autres uniquement à cause de son échelle numérique.

4.4.3.3 Sélection des Cluster Heads :

Après le calcul du score pour chaque nœud, les nœuds ayant les scores les plus élevés sont sélectionnés comme Cluster Heads. Cette méthode permet de remplacer la sélection aléatoire par une sélection plus intelligente et plus équilibrée.

Afin d'éviter une concentration excessive des Cluster Heads dans une même zone, une contrainte de distance minimale entre les CH est appliquée. Cette contrainte permet d'obtenir une meilleure répartition spatiale des clusters et d'améliorer la couverture du réseau.

Les nœuds qui ne sont pas sélectionnés comme Cluster Heads rejoignent ensuite le CH le plus proche, ce qui permet de former les clusters.

4.4.3.4 Fonctionnement du protocole LEACH-EDD-Score :

Le protocole LEACH-EDD-Score se déroule en plusieurs étapes successives organisées en rounds. Dans un premier temps, le réseau est initialisé et les nœuds sont déployés dans la zone de surveillance. Ensuite, pour chaque nœud, les critères essentiels sont calculés, à savoir l'énergie résiduelle, la distance au sink et la densité locale. Ces critères sont ensuite normalisés afin de les rendre comparables. À partir de ces valeurs normalisées, chaque nœud calcule son score, qui est utilisé pour la sélection des Cluster Heads. Les nœuds ayant les scores les plus élevés sont choisis comme CH, tout en vérifiant le respect d'une distance minimale entre eux afin d'assurer une bonne répartition spatiale. Une fois les CH

sélectionnés, les clusters sont formés et les nœuds ordinaires s'associent au Cluster Head le plus proche. Les nœuds transmettent ensuite leurs données aux CH, qui procèdent à l'agrégation avant de les envoyer vers le sink. Après chaque round, l'énergie des nœuds est mise à jour, et le processus se répète jusqu'à atteindre le nombre maximal de rounds.

Afin de mieux illustrer le fonctionnement du protocole LEACH-EDD-Score dans la phase de simulation, la figure suivante présente les principales étapes de son exécution.

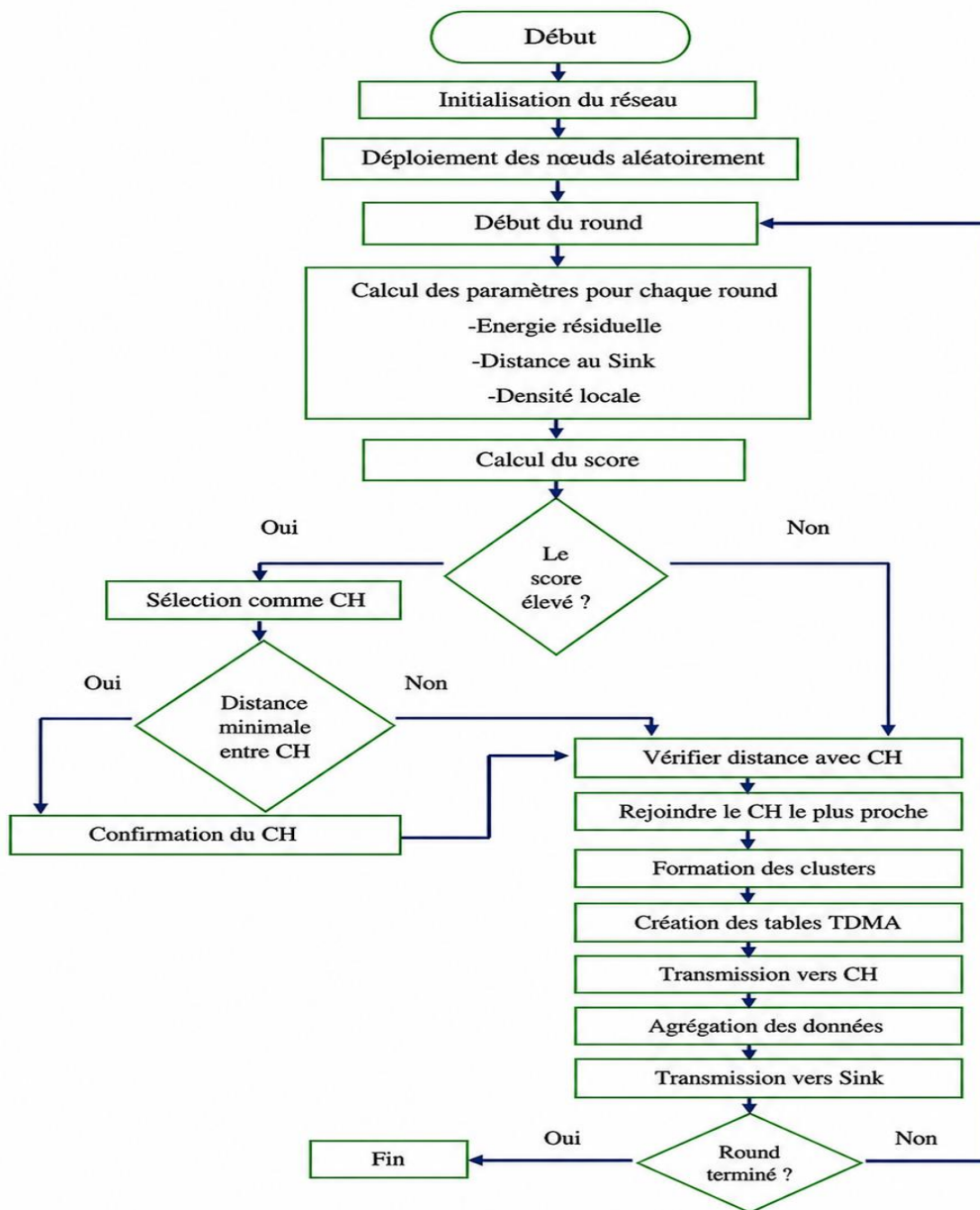


Figure 4.3 : Organigramme du protocole LEACH-EDD-Score

4.5 Résultats et analyse :

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus à partir des simulations réalisées sous MATLAB. L'objectif est de comparer les performances des protocoles LEACH, LEACH-C et du protocole LEACH-EDD-Score en se basant sur plusieurs métriques de performance.

Les conditions de simulation, notamment le déploiement du réseau, ont été présentées dans le tableau-4.1 précédent.

Afin de comparer les performances des trois protocoles, nous avons réalisés plusieurs simulations en fonction de différents métriques et aspect du réseau. Les résultats sont illustrés sous forme de figures montrant l'évolution de ces métriques au cours des différents rounds.

4.5.1 Distribution des CHs élues et densité des clusters en fonction du temps :

Dans cette partie, nous étudions la distribution spatiale des CHs dans la zone de déploiement, tout en gardons l'œil sur la densité des clusters. Cette simulation est menée en fonction du temps, c'est-à-dire l'évolution des positions des nœuds (CH, Nœud ordinaire) dans le réseau avec la progression des rounds.

L'évolution spatiale des clusters permet d'observer la manière dont les Cluster Heads sont répartis dans la zone de déploiement.

Cette analyse est importante car la position des Cluster Heads influence directement l'organisation des clusters ainsi que la communication entre les nœuds.

Une mauvaise répartition peut entraîner des zones surchargées ou mal couvertes, tandis qu'une bonne répartition permet d'améliorer l'efficacité du réseau.

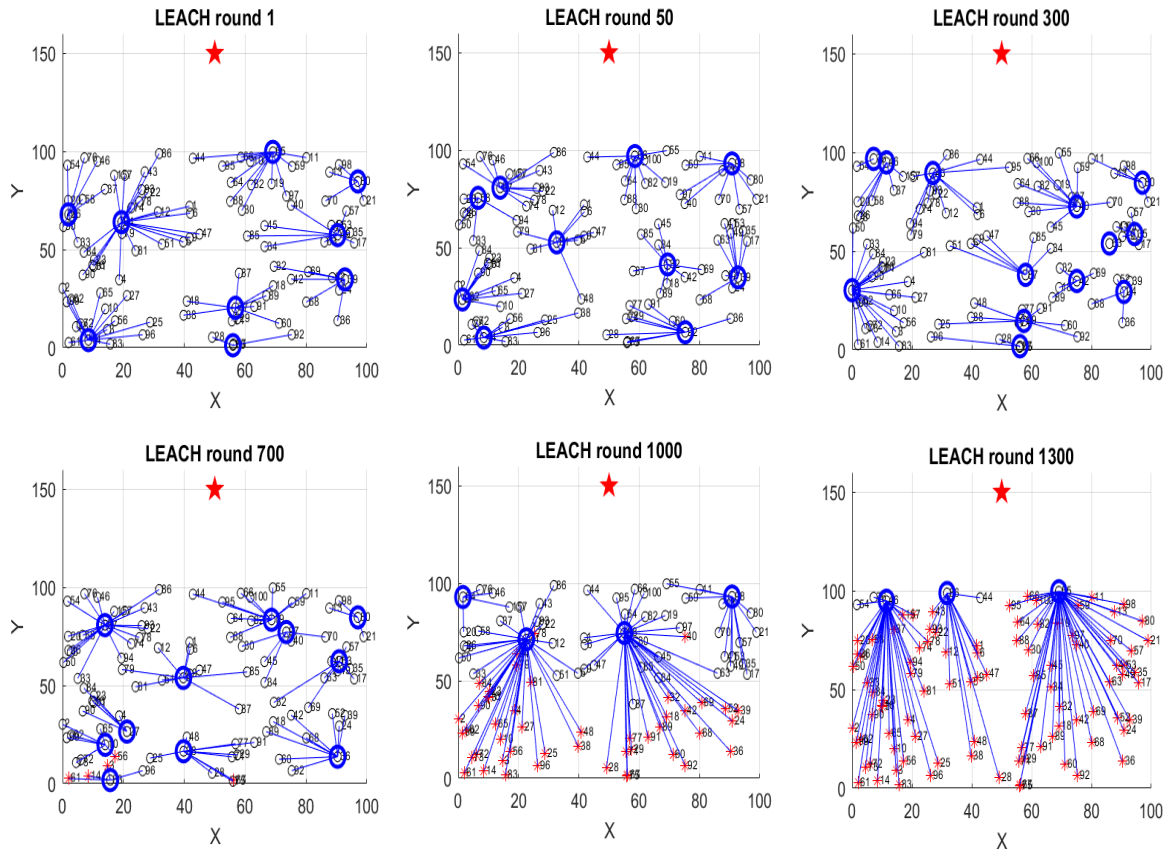


Figure 4.4 : Évolution spatiale des clusters pour le protocole LEACH

La figure 4.4 montre l'évolution spatiale des clusters pour le protocole LEACH. On observe que la sélection des Cluster Heads est aléatoire à chaque round.

Le nombre et la position des Cluster Heads varient d'un round à un autre. Parfois, plusieurs Cluster Heads sont concentrés dans une même zone, tandis que dans d'autres cas, leur nombre est insuffisant ou mal réparti.

Cette variation continue entraîne une organisation instable des clusters au cours du temps. Par conséquent, certaines zones peuvent être surchargées alors que d'autres sont moins bien couvertes, ce qui affecte l'efficacité globale du réseau.

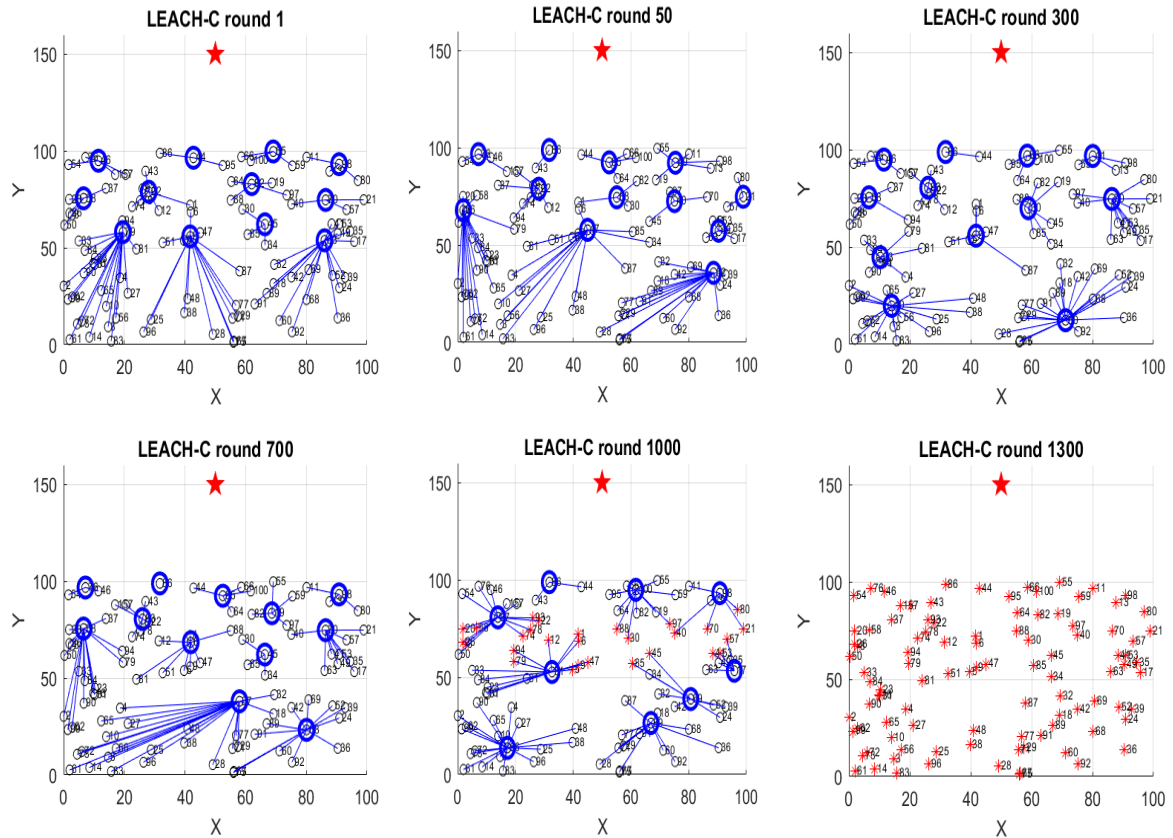


Figure 4.5 : Évolution spatiale des clusters pour le protocole LEACH-C

La figure 4.5 présente l'évolution spatiale des clusters pour le protocole LEACH-C. Contrairement à LEACH, la sélection des Cluster Heads est réalisée de manière centralisée par le sink.

On observe que la répartition des Cluster Heads est plus régulière au début de la simulation. Les clusters sont mieux organisés et couvrent la zone de manière plus équilibrée.

Cependant, avec l'augmentation des rounds et la mort progressive de certains nœuds, la structure des clusters devient moins stable. Malgré cela, la variation reste moins importante que dans le protocole LEACH, ce qui améliore l'organisation globale du réseau.

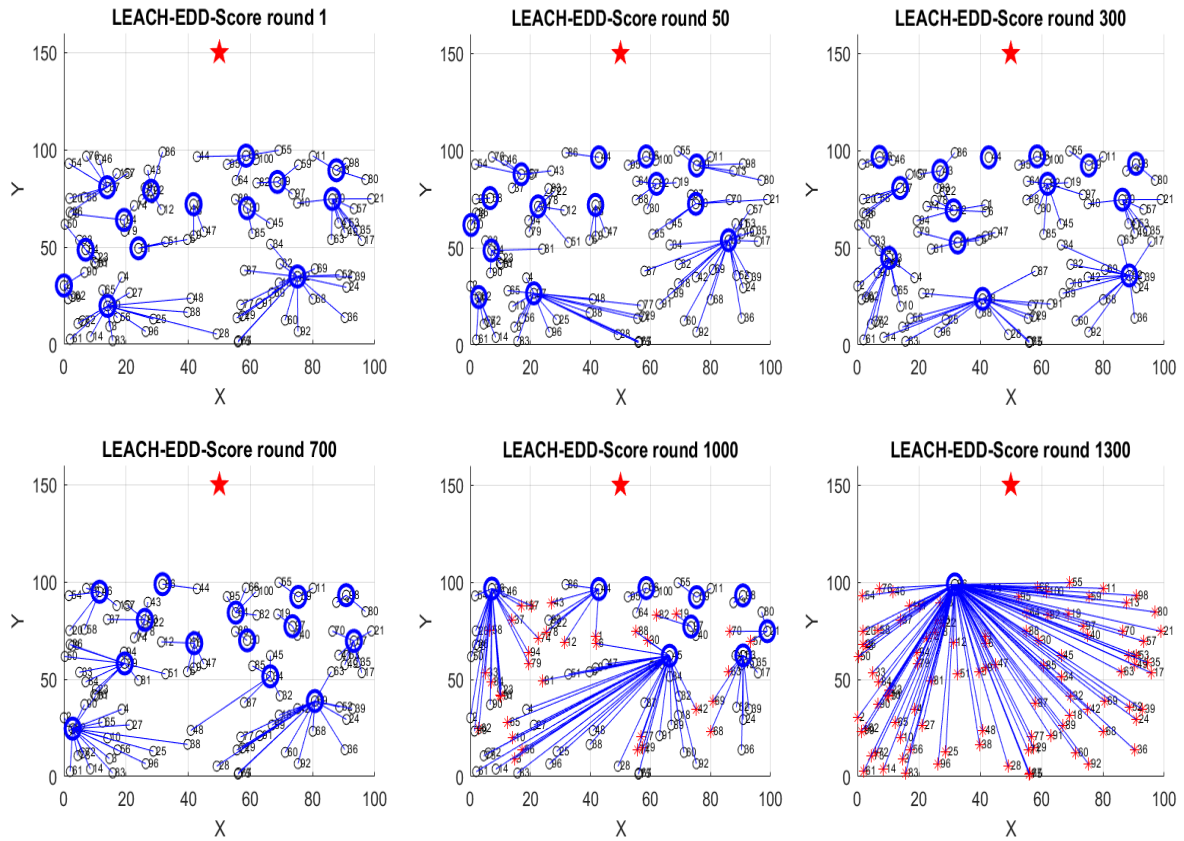


Figure 4.6 : Évolution spatiale des clusters pour le protocole LEACH-EDD-Score

La figure 4.6 illustre l'évolution spatiale des clusters pour le protocole proposé LEACH-EDD-Score. La sélection des Cluster Heads est basée sur un score combinant plusieurs critères, ce qui permet une meilleure adaptation à l'état du réseau.

On observe que la répartition des Cluster Heads est plus équilibrée dans la zone de déploiement. Le nombre de Cluster Heads reste relativement stable d'un round à un autre, avec une meilleure distribution spatiale.

Cette stabilité permet d'éviter les concentrations et les zones mal couvertes, ce qui améliore l'organisation des clusters et la gestion de l'énergie dans le réseau.

En comparant les figures précédentes, on constate que le protocole LEACH présente une forte variation dans la sélection des Cluster Heads, ce qui entraîne une organisation instable des clusters.

Le protocole LEACH-C améliore cette répartition grâce à une approche centralisée, ce qui permet d'obtenir une meilleure stabilité, surtout au début de la simulation.

Le protocole proposé LEACH-EDD-Score offre les résultats les plus équilibrés, avec une répartition plus stable des Cluster Heads et une meilleure organisation des clusters tout au long des rounds.

4.5.2 Calcul de l'énergie résiduelle des nœuds :

L'énergie résiduelle représente l'énergie restante dans le réseau au cours de la simulation. Elle diminue progressivement à chaque round en raison des opérations de transmission, de réception et d'agrégation des données.

Cette métrique permet d'évaluer l'efficacité énergétique des protocoles ainsi que leur capacité à répartir la consommation d'énergie entre les nœuds.

Une bonne gestion de l'énergie permet de prolonger la durée de vie du réseau, tandis qu'une consommation rapide entraîne une dégradation précoce des performances.

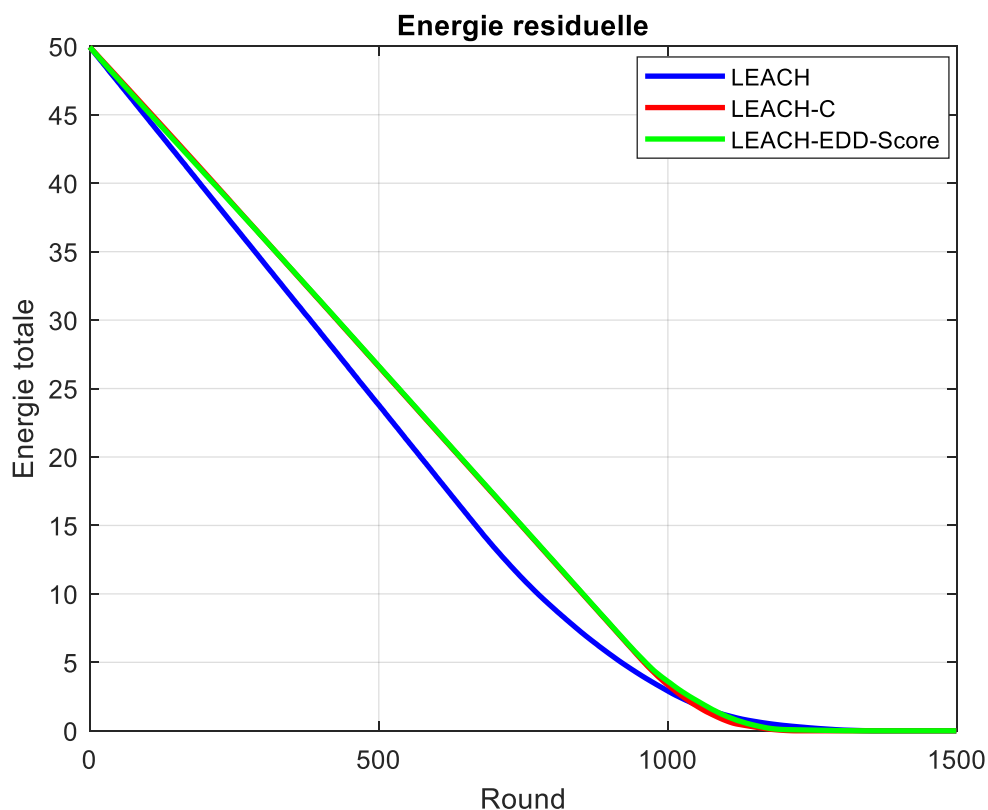


Figure 4.7 : Energie résiduelle

La figure 4.7 montre l'évolution de l'énergie totale du réseau en fonction du nombre de rounds pour les trois protocoles : LEACH, LEACH-C et le protocole LEACH-EDD-Score.

On observe que l'énergie diminue progressivement pour tous les protocoles, ce qui est normal en raison des communications entre les nœuds.

Au début de la simulation, les trois courbes sont presque confondues, ce qui indique un comportement similaire. Cependant, à partir d'un certain nombre de rounds, une différence apparaît.

Le protocole LEACH consomme l'énergie plus rapidement, ce qui s'explique par la sélection aléatoire des Cluster Heads et une répartition non équilibrée de la charge.

Le protocole LEACH-C montre une légère amélioration grâce à une meilleure organisation des clusters.

Le protocole LEACH-EDD-Score conserve une énergie légèrement plus élevée sur une durée plus longue, ce qui traduit une meilleure gestion de la consommation énergétique dans le réseau.

4.5.3 Evolution de la Couverture du réseau :

La couverture du réseau représente la partie de la zone de déploiement qui est encore surveillée par les nœuds actifs.

Au début de la simulation, la couverture est généralement élevée car la majorité des nœuds sont encore en fonctionnement. Avec le temps, les nœuds perdent leur énergie et finissent par mourir, ce qui entraîne une réduction progressive de la couverture.

Cette métrique est importante car elle permet d'évaluer la capacité du réseau à assurer sa fonction de surveillance au cours du temps.

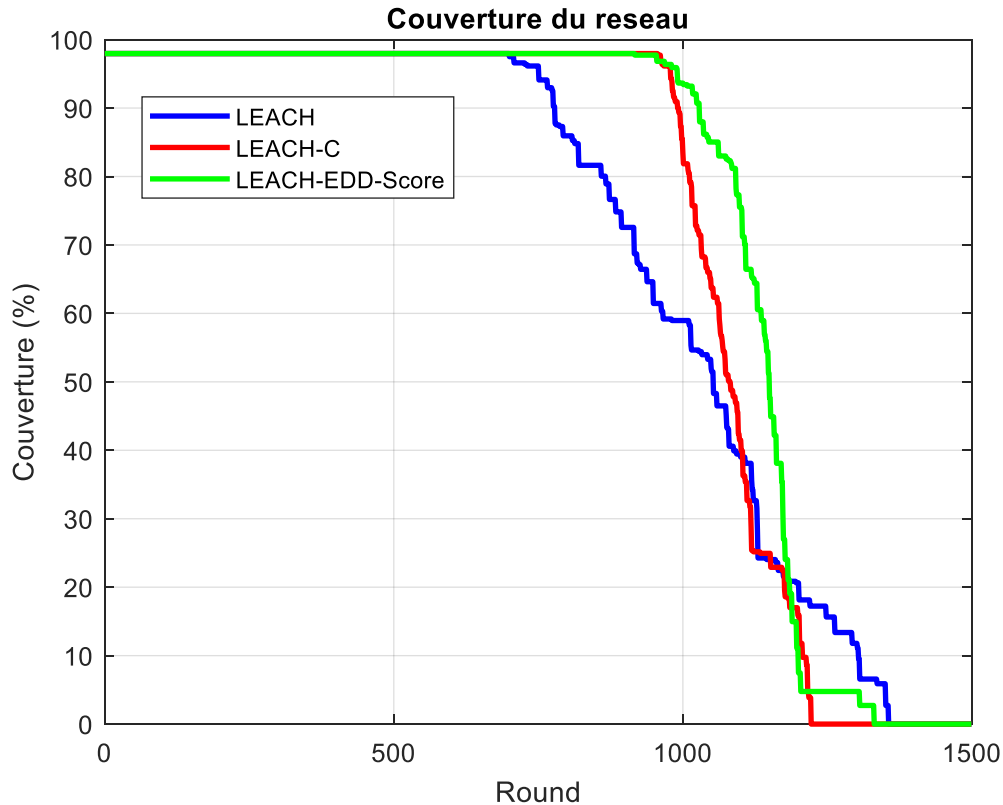


Figure 4.8 : Couverture du réseau

La figure 4.8 montre l'évolution de la couverture du réseau en fonction du nombre de rounds pour les protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score.

On observe que la couverture reste proche de 100 % au début de la simulation pour les trois protocoles, ce qui indique que presque toute la zone est couverte.

La couverture demeure presque constante durant les premiers rounds. Elle commence à diminuer lorsque le nombre de nœuds morts devient suffisamment élevé pour créer des zones non couvertes dans le réseau.

Le protocole LEACH présente une diminution progressive de la couverture, tandis que LEACH-C montre une chute plus rapide vers la fin, ce qui indique une perte brusque de couverture.

Le protocole LEACH-EDD-Score maintient une couverture élevée pendant une durée plus longue, puis la diminution devient progressive. Cela montre une meilleure gestion des nœuds actifs dans le réseau.

En général, le protocole LEACH-EDD-Score permet de conserver la couverture plus longtemps par rapport à LEACH et LEACH-C.

4.5.4 Evolution du nombre de nœuds actifs :

Le nombre de nœuds vivants représente le nombre de nœuds qui restent actifs au cours de la simulation.

Un nœud est considéré comme vivant tant que son énergie résiduelle est supérieure à zéro. Avec l'augmentation du nombre de rounds, les nœuds consomment leur énergie et finissent progressivement par mourir.

Cette métrique est importante car elle permet d'évaluer la durée de vie du réseau ainsi que la stabilité de son fonctionnement au cours du temps.

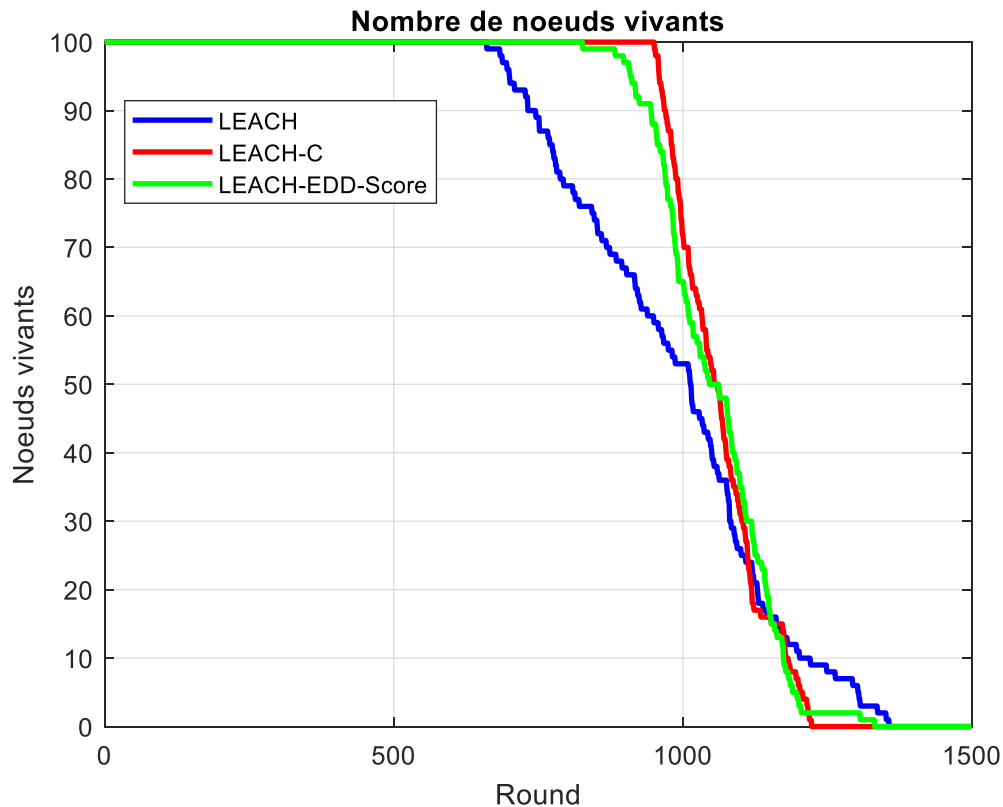


Figure 4.9 : Nombre de nœuds vivants

La figure 4.9 montre l'évolution du nombre de nœuds vivants en fonction du nombre de rounds pour les protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score.

On observe qu'au début de la simulation, tous les nœuds sont vivants, ce qui explique la stabilité des courbes.

À partir d'un certain nombre de rounds, le nombre de nœuds vivants commence à diminuer progressivement en raison de la consommation d'énergie.

Le protocole LEACH montre une diminution plus rapide du nombre de nœuds vivants, ce qui indique une consommation d'énergie moins équilibrée.

Le protocole LEACH-C présente une meilleure stabilité au début, mais on observe ensuite une chute rapide du nombre de nœuds vivants vers la fin de la simulation.

Le protocole LEACH-EDD-Score maintient un nombre plus élevé de nœuds vivants pendant une durée plus longue, ce qui traduit une meilleure gestion de l'énergie et une prolongation de la durée de vie du réseau.

4.5.5 Comparaison du nombre de Cluster Heads par round :

Le nombre de Cluster Heads représente le nombre de nœuds sélectionnés comme chefs de cluster à chaque round.

Ce paramètre est important car il influence directement l'organisation du réseau et la consommation d'énergie. Un nombre élevé de Cluster Heads peut augmenter les communications, tandis qu'un nombre faible peut entraîner une surcharge pour certains nœuds.

Un bon protocole doit maintenir un nombre de Cluster Heads relativement stable afin d'assurer un équilibre dans le réseau.

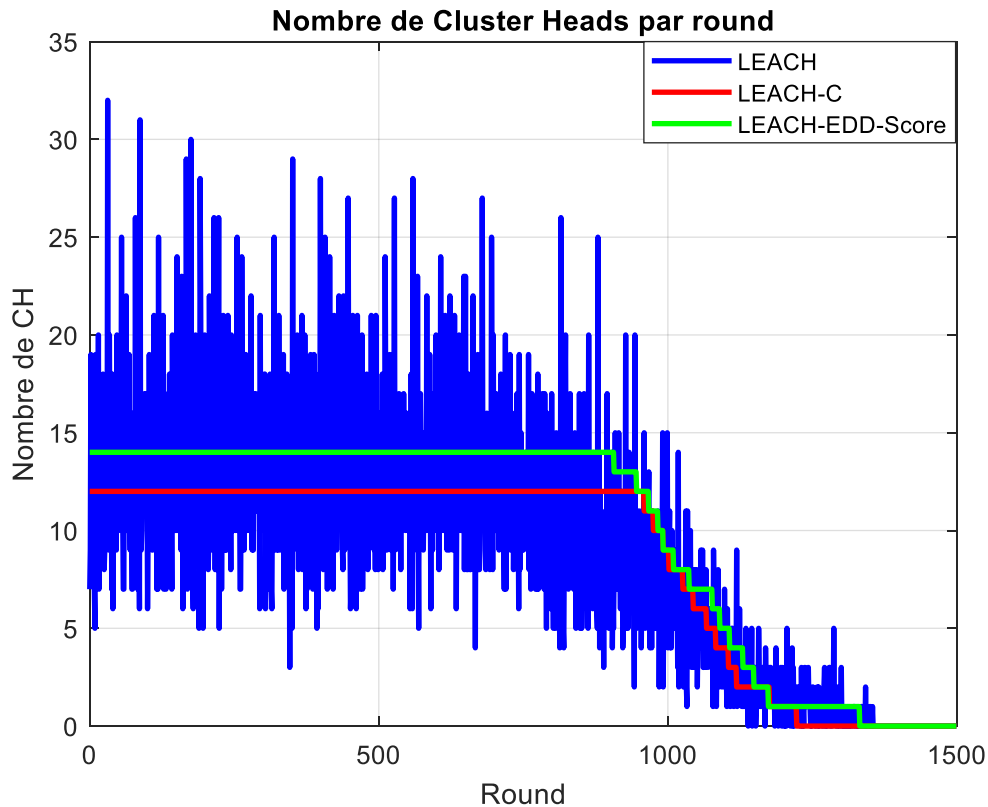


Figure 4.10 : Nombre de Cluster Heads par round

La figure 4.10 montre l'évolution du nombre de Cluster Heads en fonction du nombre de rounds pour les protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score.

On observe que le protocole LEACH présente de fortes fluctuations du nombre de Cluster Heads tout au long de la simulation. Cette instabilité est due à la sélection aléatoire, ce qui entraîne une répartition non uniforme des rôles dans le réseau.

En revanche, LEACH-C et LEACH-EDD-Score maintiennent un nombre de Cluster Heads relativement constant au début de la simulation, ce qui reflète une meilleure organisation des clusters.

Avec l'augmentation des rounds et la mort progressive des nœuds, le nombre de Cluster Heads diminue pour les trois protocoles. Toutefois, cette diminution est plus régulière et mieux contrôlée pour LEACH-C et LEACH-EDD-Score.

Ainsi, LEACH se caractérise par une forte variabilité, tandis que LEACH-C et LEACH-EDD-Score assurent une sélection plus stable et mieux adaptée à l'état du réseau.

4.5.6 Throughput ou nombre de paquets transmis :

Le nombre de paquets transmis représente la quantité totale de données envoyées vers le sink au cours de la simulation.

Cette métrique permet d'évaluer l'efficacité du protocole en termes de transmission des données. Plus le nombre de paquets transmis est élevé, plus le réseau assure correctement sa fonction de communication.

Cependant, cette performance dépend directement de l'énergie des nœuds. Lorsque les nœuds commencent à mourir, le nombre de paquets transmis diminue où se stabilise.

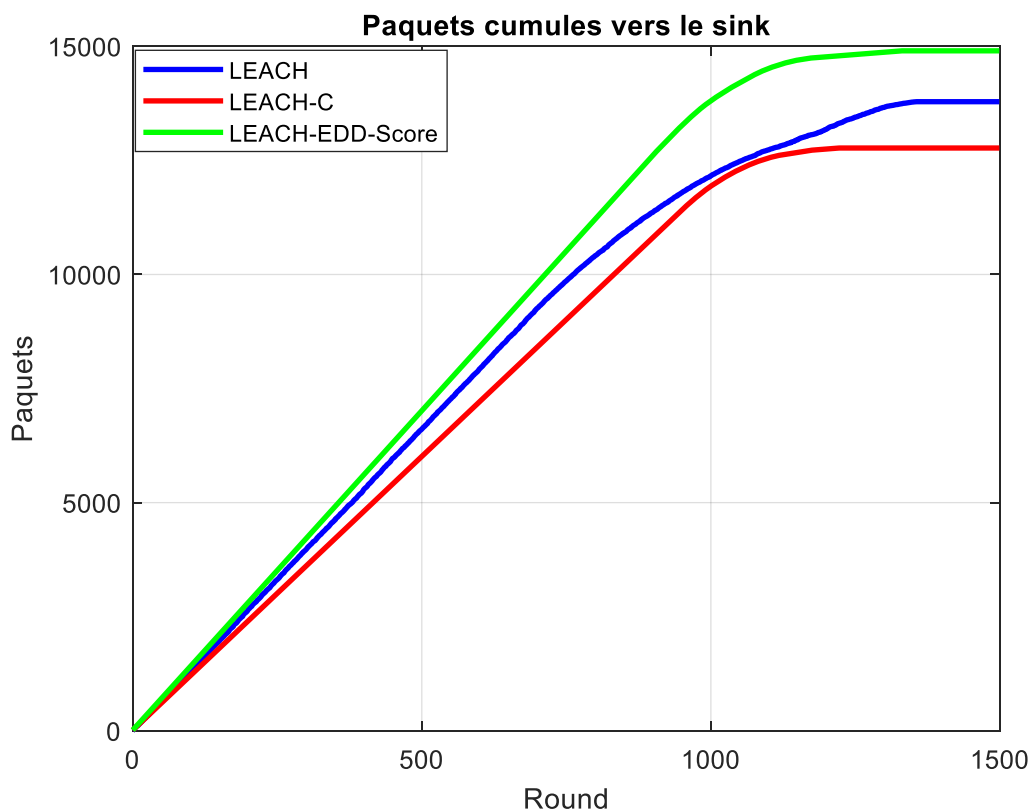


Figure 4.11 : Paquet cumules vers le Sink

La figure 4.11 montre l'évolution du nombre de paquets cumulés transmis vers le sink en fonction du nombre de rounds pour les protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score.

On observe que le nombre de paquets augmente progressivement au début de la simulation pour les trois protocoles, ce qui correspond à une activité normale du réseau.

Le protocole LEACH-EDD-Score présente le nombre le plus élevé de paquets transmis, ce qui traduit une meilleure efficacité dans la transmission des données et une activité prolongée du réseau.

Le protocole LEACH se situe en deuxième position, avec une évolution régulière, mais inférieure à celle du protocole proposé.

En revanche, LEACH-C montre une augmentation plus modérée, suivie d'une stabilisation plus précoce, en raison de la diminution du nombre de nœuds actifs vers la fin de la simulation.

Généralement, LEACH-EDD-Score permet de transmettre un plus grand nombre de données tout en maintenant une activité plus durable du réseau, tandis que LEACH reste performant mais consomme plus rapidement son énergie.

4.5.7 Comparaison des trois protocoles avec les métriques FND / HND / LND :

Les métriques FND (First Node Dies), HND (Half Nodes Die) et LND (Last Node Dies) sont utilisées pour évaluer la durée de vie du réseau.

Le FND correspond au round où le premier nœud meurt, ce qui permet d'évaluer la stabilité initiale du réseau.

Le HND indique le moment où 50 % des nœuds sont morts, ce qui représente la phase intermédiaire du fonctionnement.

Le LND correspond à la fin de vie du réseau, lorsque tous les nœuds ont épuisé leur énergie.

Ces métriques permettent de comparer les performances des protocoles en termes de durée de vie et de stabilité.

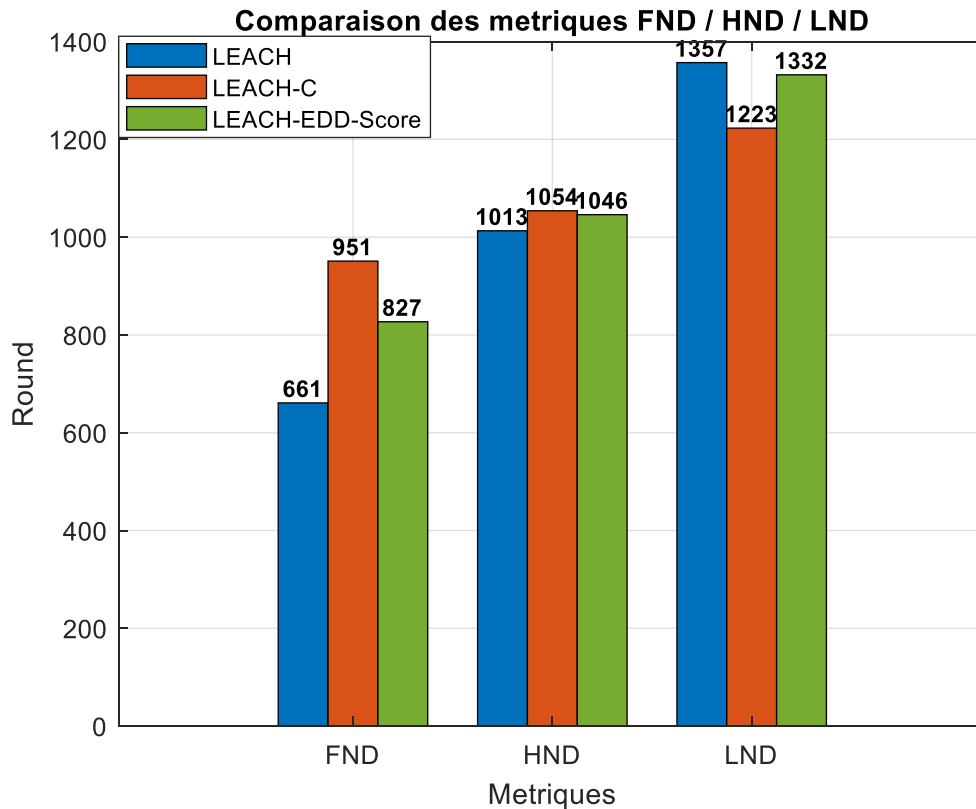


Figure 4.12 : Comparaison de la durée de vie du réseau (FND, HND, LND)

La figure 4.12 présente la comparaison des métriques FND, HND et LND pour les protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score.

On observe que LEACH-C présente une meilleure performance en termes de stabilité initiale, en retardant la première mort de nœud (FND).

Le protocole LEACH-EDD-Score montre également de bonnes performances, légèrement inférieures à LEACH-C, mais supérieures à celles de LEACH.

Pour la métrique HND, LEACH-C reste en tête, suivi de LEACH-EDD-Score, puis de LEACH, ce qui indique une meilleure stabilité au milieu de la durée de vie du réseau.

Concernant le LND, LEACH présente la plus grande durée de vie totale du réseau, tandis que LEACH-EDD-Score offre un compromis entre stabilité initiale et durée de vie globale.

Ainsi, LEACH-C améliore la stabilité initiale, LEACH prolonge la durée de vie totale, tandis que LEACH-EDD-Score assure un équilibre entre les différentes performances.

4.5.8 Comparaison globale des performances :

Afin de résumer les résultats obtenus, une comparaison globale des principales métriques est présentée.

Cette analyse permet d'avoir une vue d'ensemble du comportement des protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score, notamment en termes de consommation d'énergie, de couverture, de nombre de paquets transmis et de nombre de Cluster Heads.

Elle permet ainsi de comparer leurs performances dans les mêmes conditions de simulation.

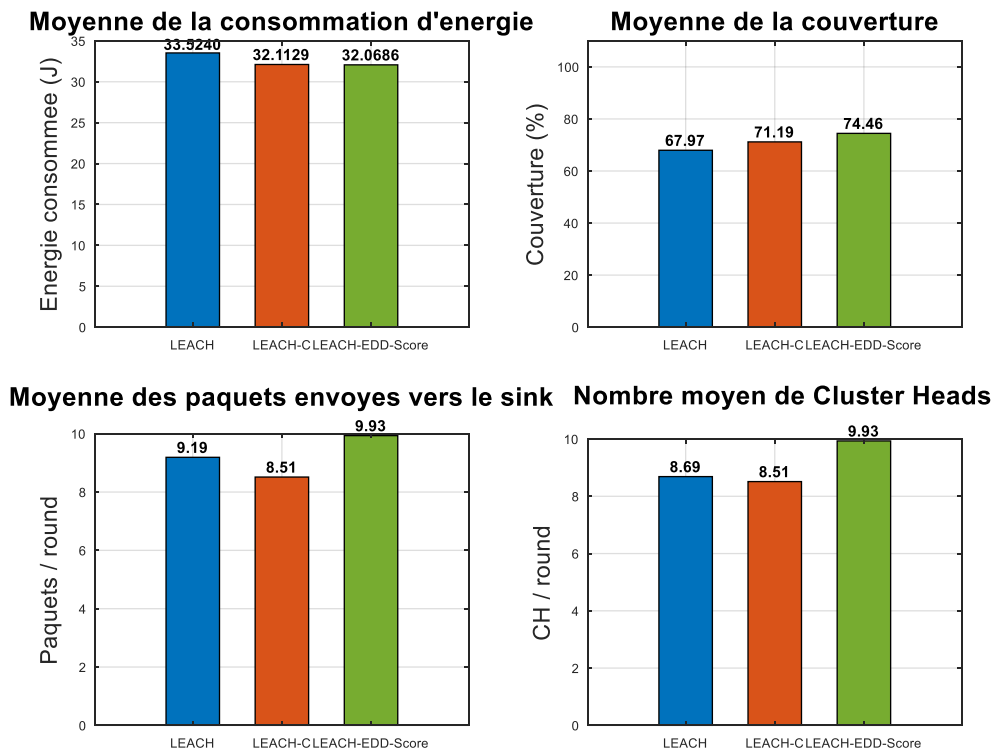


Figure 4.13 : Comparaison des performances moyennes des protocoles

La figure 4.13 présente une comparaison globale des performances moyennes des protocoles étudiés.

On observe que la consommation d'énergie est relativement proche pour les trois protocoles, avec une valeur légèrement plus élevée pour LEACH, ce qui traduit une activité plus intense du réseau.

En termes de couverture, le protocole LEACH-EDD-Score présente la meilleure performance, suivi de LEACH-C, puis de LEACH. Cela montre une meilleure capacité du protocole proposé à maintenir une bonne couverture du réseau dans le temps.

Concernant le nombre de paquets envoyés vers le sink, LEACH-EDD-Score enregistre la valeur la plus élevée, ce qui indique une transmission de données plus efficace. LEACH arrive en deuxième position, tandis que LEACH-C reste légèrement en dessous.

Pour le nombre moyen de Cluster Heads, LEACH-EDD-Score présente la valeur la plus élevée, ce qui reflète une meilleure organisation et une couverture plus large des clusters, alors que LEACH-C montre la valeur la plus faible.

Ainsi, les résultats montrent que le protocole LEACH-EDD-Score améliore la couverture et la transmission des données, tout en maintenant une consommation d'énergie comparable aux autres protocoles.

4.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude comparative entre les protocoles LEACH, LEACH-C et le protocole proposé LEACH-EDD-Score a été réalisée à travers plusieurs métriques de performance.

Les résultats obtenus montrent que le protocole LEACH présente une consommation d'énergie légèrement plus élevée ainsi qu'une forte variabilité dans la sélection des Cluster Heads, en raison de son caractère aléatoire.

Le protocole LEACH-C améliore la stabilité initiale du réseau grâce à une sélection centralisée des Cluster Heads, mais ses performances diminuent progressivement avec la mort des nœuds.

Le protocole LEACH-EDD-Score, proposé dans ce travail, permet une meilleure répartition des Cluster Heads et assure une couverture plus élevée ainsi qu'une transmission de données plus efficace.

Ainsi, les résultats montrent que le protocole LEACH-EDD-Score constitue une approche équilibrée, permettant d'améliorer certaines performances du réseau tout en maintenant une consommation d'énergie comparable aux autres protocoles.

Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), une technologie devenue essentielle dans plusieurs domaines tels que la surveillance environnementale, les applications industrielles, médicales et les systèmes intelligents. Grâce à leur flexibilité, leur faible coût de déploiement et leur capacité d'auto-organisation, ces réseaux connaissent un développement croissant dans de nombreux secteurs. Toutefois, ils sont confrontés à certaines contraintes techniques, notamment la consommation énergétique des nœuds capteurs, qui influence directement la durée de vie du réseau ainsi que la qualité des communications. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif principal était d'étudier et d'améliorer les performances des protocoles de routage hiérarchiques dans les réseaux RCSF.

Dans un premier temps, nous avons présenté les notions fondamentales liées aux réseaux de capteurs sans fil, notamment leur architecture, leurs composants, leurs caractéristiques ainsi que leurs domaines d'application. Cette étude nous a permis de mieux comprendre les contraintes principales des réseaux RCSF, en particulier la limitation énergétique des nœuds et l'importance des protocoles de communication dans l'optimisation et l'amélioration des performances du réseau.

Par la suite, nous avons étudié les protocoles MAC ainsi que les différentes catégories de protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil. Une attention particulière a été accordée aux protocoles hiérarchiques basés sur le clustering, car ils représentent une solution efficace pour réduire la consommation énergétique et améliorer l'organisation du réseau. Nous avons également étudié plusieurs protocoles connus tels que TEEN, DEEC, NEEC, PEGASIS et APTEEN afin de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement, leurs avantages ainsi que leurs limites.

Ensuite, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au protocole LEACH, considéré comme l'un des protocoles hiérarchiques les plus importants dans les réseaux RCSF. L'étude de ce protocole nous a permis de comprendre son fonctionnement fondamental basé sur le clustering ainsi que ses différentes phases opérationnelles. Nous avons également analysé ses principaux avantages, notamment sa simplicité et sa capacité à répartir la consommation énergétique entre les nœuds. Cependant, cette étude a également montré certaines limitations importantes, principalement liées à la sélection aléatoire des

Cluster Heads, pouvant entraîner une mauvaise répartition de la charge et une consommation énergétique non équilibrée.

Afin d'améliorer ces performances, nous avons proposé une amélioration du protocole LEACH appelée LEACH-EDD-Score. Cette approche repose sur un mécanisme de score permettant de sélectionner les Cluster Heads de manière plus efficace en prenant en compte plusieurs critères importants tels que l'énergie résiduelle, la distance au sink ainsi que la densité locale des nœuds. L'objectif principal était d'obtenir une meilleure organisation des clusters et un meilleur équilibre dans la consommation énergétique du réseau.

Les simulations réalisées sous MATLAB nous ont permis de comparer les performances des protocoles LEACH, LEACH-C et LEACH-EDD-Score à travers plusieurs métriques telles que la consommation d'énergie, la couverture du réseau, le nombre de paquets transmis. Le protocole LEACH possède des avantages selon la métrique étudiée. Le protocole LEACH présente une activité importante mais avec une forte instabilité dans la sélection des Cluster Heads et une consommation énergétique relativement élevée. Le protocole LEACH-C améliore la stabilité initiale grâce à son approche centralisée. Quant au protocole proposé LEACH-EDD-Score, il a montré un comportement plus équilibré en améliorant la couverture du réseau et la transmission des données tout en maintenant une consommation énergétique proche des autres protocoles simulés.

Même si l'amélioration énergétique obtenue reste modérée, notre approche a permis d'obtenir un meilleur compromis entre plusieurs performances importantes du réseau. Ce travail montre ainsi que l'utilisation d'une approche multi-critères dans la sélection des Cluster Heads peut contribuer à améliorer les performances globales des réseaux de capteurs sans fil sans modifier complètement le principe du protocole LEACH original.

Enfin, ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux RCSF, des protocoles de routage hiérarchiques ainsi que de la simulation sous MATLAB. Il constitue également une base intéressante pour de futurs travaux de recherche portant sur l'optimisation énergétique et l'amélioration des performances des réseaux RCSF.

Perspectives :

Comme perspectives, plusieurs améliorations peuvent être envisagées afin de développer davantage ce travail et d'améliorer les performances du protocole proposé.

Tout d'abord, il serait intéressant d'étudier le comportement du protocole LEACH-EDD-Score dans différents scénarios de simulation en modifiant certains paramètres du réseau tels que le nombre de nœuds, la taille de la zone de déploiement ou encore la position du sink. Cela permettrait d'évaluer plus précisément les performances du protocole dans des environnements variés.

Il serait également possible d'intégrer de nouveaux critères dans le calcul du score afin d'obtenir une sélection encore plus efficace des Cluster Heads. Parmi ces critères, on peut citer la qualité du lien de communication, le délai de transmission, le trafic du réseau ou encore la mobilité des nœuds.

Une autre perspective intéressante serait l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle et des algorithmes d'optimisation, comme les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones ou la logique floue, afin d'adapter dynamiquement le choix des Cluster Heads selon l'état du réseau.

Par ailleurs, il serait utile de tester le protocole proposé dans des réseaux hétérogènes contenant des nœuds ayant différentes capacités énergétiques afin de rapprocher davantage les simulations des conditions réelles.

Enfin, l'implémentation du protocole dans un environnement réel à l'aide de capteurs physiques constituerait une étape importante pour évaluer ses performances pratiques et vérifier les résultats obtenus par simulation.

Ainsi, ce travail ouvre plusieurs perspectives de recherche dans le domaine des protocoles de routage hiérarchiques et contribue à l'amélioration des performances énergétiques et organisationnelles des réseaux de capteurs sans fil

Bibliographie :

- [1] Ian F. Akyildiz et al, "A Survey on Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, August 2002.
- [2] Waltenegus Dargie, C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, Wiley, 2010, pp. 3–7.
- [3] M. M. Diouri, "Réseaux de capteurs sans-fil : routage et sécurité," mémoire, INSA Lyon, 2009–2010.
- [4] A. BEGHRICHE et A. BILAMI, "Un modèle de confiance pour l'authentification dans un réseau sans-fil Ad hoc," *Journées Ecole Doctorale & Réseaux de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information JED'08*, Université Annaba, Juin 2008.
- [5] Akyildiz, I. F et al. (2002). "Wireless sensor networks: a survey." *Computer Networks*, 38(4), 393-422.
- [6] Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) (2020), *Bulletin des Energies Renouvelables*, N° 50, Décembre 2020. Alger : CDER. Disponible à : https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber50_14_15.pdf
- [7] Waltenegus Dargie, C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, Wiley, 2010, pp. 11–15.
- [8] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, 2009.
- [9] T. Voigt, H. Ritter, and J. Schiller, "Utilizing solar power in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'03)*, pp. 416–422, October 2003.
- [10] S. Harchi, *Un protocole de session dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Lorraine, France, 2013.
- [11] O. R. Merad Boudia, *Agrégation des données et sécurité des réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Tlemcen, May 2014.
- [12] V. Raghunathan, C. Schurgers, P. Sung, and M. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 40–50, 2002.

- [13] Q. Mamun, "A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks," *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 11, pp. 14887–14913, 2012.
- [14] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Chichester, U.K. : John Wiley & Sons, 2005.
- [15] Turner, J. (2021). "Medium Access Control Protocols in Computer Networks." *Journal of Networking Fundamentals*.
- [16] García, L., & Klein, M. (2020). *Principles of Computer Networking*. National University Press.
- [17] Forouzan, B. A. (2017). *Data Communications and Networking*. McGraw-Hill Education.
- [18] Mahul Antoine, "Apprentissage de la qualité de service dans les réseaux multiservices : applications au routage optimal sous contraintes," thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2005.
- [19] RISC : Réseaux Hétérogènes intelligents pour situation de CRISE, "Etat de l'art sur les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc," 2008.
- [20] Meraihi Rabah, "Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc," thèse de doctorat, France, 2005.
- [21] E. DHIB, "Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de Capteurs," mémoire d'Ingénieur en Télécommunications, option : Ingénierie des réseaux, École Supérieure de Communication de Tunis, 2006/2007.
- [22] M. Erwan ERMEL, "Localisation et Routage géographique dans les réseaux sans fil hétérogènes," thèse, Université Pierre et Marie CURIE, 21 Juin 2004.
- [23] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, Oct. 2002, pp. 663–665.
- [24] S. Lindsey and C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems," in *Proceedings of IEEE International Aerospace Conference*, vol. 3, pp. 1125–1130, 2002.

- [25] A. MANJESHWAR et D. P. ARGARWAL, "TEEN : à routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, Oct. 2002.
- [26] N. V. K. Subramanian, "Survey on Energy-Aware Routing and Routing Protocols for Sensor Networks," tech. rep., Technical Report, Department of Computer Science, University of North Carolina Charlotte, North Carolina, USA, 2004.
- [27] Updeep Kour, Sandeep Sharma, "Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering Protocol: Using Priority Queue," *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, E-ISSN: 2347-2693, 2 Feb 2019.
- [28] Bozorgi, S. M., Rostami, A. S., Hosseinabadi, A. A. R., & Balas, V. E. (2017). "A new clustering protocol for energy harvesting-wireless sensor networks." *Computers & Electrical Engineering*, 64, 233-247.
- [29] Université de Technologie de Compiègne (UTC) (s.d.), *Cours LEACH*. Disponible à : https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_78.html
- [30] Mohammed Hadadj et Malek KHENFER, "Étude comparative entre les protocoles de Routage RCSF," Mémoire de Master Professionnel en informatique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016-2017.
- [31] Bilami Azeddine, "Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil," Mémoire de Magistère en Informatique, Université de l'Hadj Lakhdar Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département d'informatique, Promotion 2007-2008.
- [32] M. GHEBBI Sofiane, "Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil," Mémoire de Master Recherche, Université A. Mira de Béjaïa, Faculté des Sciences Exactes, 2016.
- [33] H. Nabila et M. Salima, "Simulation du Routage dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils," mémoire de Master en Informatique, Université A. Mira de Bejaïa, Année : 2016-2017.
- [34] HANES, D., SALGUEIRO, G., GROSSETETE, P., BARTON, R. et HENRY, J. (2014). *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the*

Internet of Things. Indianapolis : Cisco Press. Disponible sur :
<https://books.google.dz/books?id=VAG7BQAAQBAJ>

[35] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.

[36] X. Wang, L. Kan, and Y. Han, "An Energy-Efficient Inter-Cluster Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Based on Ant Colony Optimization," in Proc. ICCSEE, 2012, pp. 248-251.

[37] J. S. Lee and W. L. Cheng, "Fuzzy Logic-Based Clustering Approach for Wireless Sensor Networks Using LEACH Protocol," in Proc. IEEE-CAA, 2013.

[38] P. Sharma and P. K. Verma, "Improvement on LEACH: Seeded LEACH-KED," *International Journal of Computer Applications*, vol. 117, no. 21, pp. 42-47, May 2015.