

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique



Université 20 Aout 1955 Skikda
Faculté des sciences
Département d'informatique



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Master
académique en informatique

Option : Réseaux et Systèmes Distribués (RSD)

Thème

**Simulation et Comparaison des protocoles de routage
hétérogènes DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC
pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil.**

Réalisé par :

**BABORI Nassima
DAOUD Dalida**

Encadré par :

Dr. REDJIMI Kenza

Année universitaire

2024-2025

Remerciements

*Nous remercions tout d'abord Dieu le Tout-Puissant
pour la force et la persévérance qui nous ont permis
de mener à bien ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont à notre encadrant,
Dr. Redjimi Kenza, pour son accompagnement,
sa disponibilité et ses précieux conseils
tout au long de ce projet.*

*Nous exprimons également notre gratitude
aux membres du jury pour avoir accepté
d'évaluer ce travail.*

*Merci à toutes les personnes qui nous ont soutenus,
de près ou de loin.*

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À ma famille, pour leur présence, leurs encouragements et leurs prières.

À mes enseignant(e)s, qui m'ont transmis leur savoir avec passion et bienveillance.

À mes amis et collègues, pour leur aide, leurs conseils et les moments partagés.

*À toutes celles et ceux qui de
Près ou de loin, ont contribué à la réussite
de ce travail.*

Résumé

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs) sont constitués de nœuds autonomes capables de surveiller des conditions physiques (température, humidité, pression, etc.) et de transmettre les données à une station de base. Utilisés dans divers domaines (militaire, médical, environnemental), ces réseaux doivent relever plusieurs défis, notamment la **gestion énergétique**, en raison de la capacité limitée des batteries des capteurs.

Parmi les solutions proposées, le routage hiérarchique, basé sur la formation de clusters, permet d'optimiser la consommation énergétique. Dans ce modèle, les nœuds à forte énergie sont sélectionnés comme chefs de cluster pour assurer la collecte et la transmission des données, tandis que les nœuds à faible énergie se concentrent sur la détection. Cette approche améliore l'efficacité du réseau et prolonge sa durée de vie.

Dans ce travail, nous avons réalisé une étude comparative entre les protocoles de routage hiérarchique hétérogène, DEEC, EDEEC, DDEEC et TDEEC en nous appuyant sur des simulations réalisées avec Matlab. Les résultats ont démontré que le protocole TDEEC offre de meilleures performances en termes de longévité et d'efficacité énergétique.

Mots clés : Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs), routage hiérarchique, clustering, DEEC, EDEEC, DDEEC, TDEEC, efficacité énergétique, Hétérogénéité.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) are composed of autonomous nodes capable of monitoring physical conditions (such as temperature, humidity, pressure, etc.) and transmitting data to a base station. Widely used in various fields (military, medical, environmental), these networks face several challenges, especially energy management due to the limited battery capacity of the sensor nodes.

Among the proposed solutions, hierarchical routing based on cluster formation helps optimize energy consumption. In this model, high-energy nodes are selected as cluster heads to collect and transmit data, while low-energy nodes focus on sensing. This approach improves network efficiency and extends its life time.

In this study, we conducted a comparative analysis of heterogeneous hierarchical routing protocols—DEEC, EDEEC, DDEEC, and TDEEC—based on simulations performed in Matlab. The results showed that TDEEC provides better performance in terms of network longevity and energy efficiency.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSNs), hierarchical routing, clustering, DEEC, EDEEC, DDEEC, TDEEC, energy efficiency, heterogeneity.

المخلص

تتكون شبكات المستشعرات اللاسلكية (RCSFs) من عقد مستقلة قادرة على مراقبة الظروف الفيزيائية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط، وغيرها، وإرسال البيانات إلى محطة قاعدة. تُستخدم هذه الشبكات في مجالات متعددة مثل المجال العسكري، الطبي، والبيئي، لكنها تواجه تحديات عدة، أبرزها إدارة الطاقة بسبب محدودية سعة بطاريات العقد.

من بين الحلول المقترحة، يعتبر التوجيه الهرمي المبني على تكوين العناقيد من أكثر الأساليب كفاءة في تحسين استهلاك الطاقة. في هذا النموذج، يتم اختيار العقد ذات الطاقة العالية كرؤساء عناقيد لجمع البيانات ونقلها، بينما تركز العقد ذات الطاقة المنخفضة على عملية الاستشعار فقط. هذه الطريقة تساهم في تحسين كفاءة الشبكة وإطالة عمرها.

في هذا العمل، قمنا بدراسة مقارنة بين بروتوكولات التوجيه الهرمي غير المتجانسة DEEC، EDEEC، DDEEC و TDEEC اعتماداً على محاكاة باستخدام برنامج Matlab. وقد أظهرت النتائج أن بروتوكول TDEEC يقدم أفضل أداء من حيث الكفاءة الطاقية وطول عمر الشبكة.

الكلمات المفتاحية: شبكات المستشعرات اللاسلكية (RCSFs)، التوجيه الهرمي، العقدة، DEEC، EDEEC، DDEEC، TDEEC، كفاءة الطاقة، عدم التجانس.

Tables des matières

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction Générale.....	13
Chapitre1: Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil.....	16
1.1 Introduction.....	16
1.2 Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs).....	16
1.2.1 Définition d'un Réseau de Capteurs.....	16
1.2.2 Définition d'un Réseau de Capteurs Sans Fil.....	16
1.2.3 Architecture d'un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF).....	17
1.2.4 Principales caractéristiques d'un nœud capteur sans fil.....	18
1.2.5 Architecture matériel d'un nœud capteur	20
1.3 La Pile Protocolaire (Modèle en couches):.....	21
1.3.1 La couche physique.....	22
1.3.2 La couche de liaison.....	22
1.3.3 La couche réseau.....	22
1.3.4 La couche transport.....	22
1.3.5 La couche application.....	23
1.4 Domaine d'application des reseaux de capteurs sans fils.....	23
1.4.1 Environnement.....	23
1.4.2 Santé.....	23
1.4.3 Industrié.....	24
1.4.4 Agriculture.....	24
1.4.5 Domotique et bâtiments intelligents.....	24
1.4.6 Transport.....	24
1.4.7 Militaires et sécurité.....	24
1.5 Systèmes d'exploitation pour les capteurs sans fils.....	25
1.5.1 TinyOS.....	25
1.5.2 Conitiki.....	25
1.5.3 RiotOS.....	26
1.5.4 LiteOS.....	26
1.5.5 MANTIOS.....	26
1.5.6 SOS.....	26
1.6 Problématiques liées aux RCSF.....	27
1.6.1 L'environnement.....	27
1.6.2 L'énergie.....	28
1.6.3 Topologie du réseau.....	29
1.6.4 La tolérance aux fautes.....	29
1.6.5 L'échelle.....	30
1.6.6 Les couts de production.....	30
1.7 Conclusion.....	30
2. Chapitre 2: Les protocoles de routage hétérogènes dans les réseaux de capteurs sans fil.	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Les protocoles de routages.....	32

2.3 L'objectif du protocole de routage.....	33
2.4 Classification des protocoles de routage pour RCSF.....	34
2.4.1 Selon la topologie du réseau.....	35
2.4.2 Selon l'établissement des routes.....	37
2.4.3 Selon son fonctionnement	40
2.4.4 Le Paradigme de Communication.....	41
2.4.5 Le modèle de livraison des données.....	42
2.5 Conclusion.....	42
3. Chapitre3: Les protocoles de routage hétérogènes dans les réseaux de capteurs sans fil.....	44
3.1 introduction.....	44
3.2 Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil.....	44
3.3 Les réseaux hétérogènes.....	47
3.3.1 Le modèle hétérogène.....	47
Le clustering.....	48
La classification des clusters distingue deux types de réseaux	49
3.3.4 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	50
3.3.5 DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering).....	54
3.3.6 DDEEC (Developed Distributed Energy-Efficient Clustering).....	56
3.3.7 EDEEC (Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering).....	57
3.3.7 TDEEC (Threshold Distributed Energy Efficient Clustering).....	58
3.3.8 BEENISH (Balanced Energy Efficient Network Integrated Super Heterogeneous).....	59
3.3.8 I-BEENISH (Improved Balanced Energy Efficient Network Integrated Super Heterogeneous) :.....	60
3.4 Conclusion.....	61
4. Chapitre4 : Implémentation et résultats	63
4.1 Introduction.....	63
4.2 Environnement de développement.....	63
4.2.1 Matériel utilisé.....	63
4.2.2 L'environnement MATLAB.....	64
4.3 Les paramètres de simulation.....	65
4.4 Résultats de la Simulation.....	66
4.4.1 Interface utilisateur.....	66
4.4.2 Déploiement des nœuds.....	67
4.4. Évolution des nœuds vivants :.....	68
4.4.4 Nombre de Cluster Heads par round	69
4.4.5 Évolution des nœuds morts	70
4.4.6 Nombre de paquets envoyés à la station de base	71
4.5 Tableau comparatif des protocoles DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC.....	72
4.6 Conclusion synthétique.....	72
4.7 Conclusion	72
Conclusion Générale.....	75

Liste des figures

Figure 1.1 : les composants d'un Nœud capteur.....	21
Figure 1.2: La pile Protocolaire dans Les RCSFs.....	22
Figure 1.3: Réseau Capteur sans Fil Santé	23
Figure 1.4: Réseau Capteur sans Fil dans les applications Militaires.....	25
Figure 1.5: Architecture de TinyOs	26
Figure 1.6 : SOS Architecture	27
Figure 2.1 : Exemple d'un protocole de routage.....	33
Figure 2. 2 : Classification des protocoles de routage pour RCSF	35
Figure 2. 3 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la Topologie du réseau	35
Figure 2.4 : SPIN Protocole	37
Figure 2.5 : Routage plat (flat based-routing).....	38
Figure 2.6 : Protocole de Routage avec Localisation Géographique	38
Figure 2.7 : Topologie hiérarchique.....	39
Figure 3.1 : Le modèle d'énergie.....	46
Figure 3.2 : Routage hiérarchique.....	50
Figure 3.3 : Architecture du routage hiérarchique LEACH	51
Figure 3.4 : algorithme de la phase d'initialisation	53
Figure 3.5 : Transmission des données à la station de base	54
Figure 4.1 : Logo Matlab 2014a.	65
Figure 4.2 : Interface utilisateur du simulateur.....	66
Figure 4.3 : Déploiement des nœuds.....	67
Figure 4.4 : Évolution des nœuds vivants par round.....	68
Figure 4.5 : Nombre de Cluster Heads par round.....	69
Figure 4.6 : Évolution des nœuds morts par round.....	70
Figure 4.7 : Paquets envoyés vers la station de base.....	71

Liste des tableaux

Table 3.1 Modèles de réseaux hétérogènes.	48
Tableau 4. 1: Les paramètres de simulation.....	65
Tableau 4.2: Comparaison des performances des protocoles de routage hiérarchiques hétérogènes dans un réseau de capteurs sans fil.....	72

Liste des abréviations

RCSF :Réseaux de Capteurs Sans Fil

WSN: Wireless Sensor Network

CH: Cluster Head

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical

PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

MATLAB : MATrixLABoratory

SB : Station de base

MAC: Media Access Control

TDMA: Time Division Multi Access

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

OSI: International Standardization Organization

QoS: Quality of Service

WSN: Wireless Sensor Network

WDC-LEACH-C : Weighted Density Center-Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

Introduction générale

Introduction générale

Depuis leur émergence, les réseaux sans fil ont connu un essor considérable, suscitant un intérêt croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Leur évolution a conduit à l'apparition de plusieurs architectures, notamment les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil, ainsi que les réseaux Ad hoc. Parmi ces avancées, les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) ont vu le jour ces deux dernières décennies, marquant une avancée technologique majeure.

Grâce aux progrès réalisés dans ce domaine, les RCSFs ont trouvé des applications variées, notamment dans les secteurs militaires, médical et environnemental, renforçant ainsi leur importance dans la recherche scientifique. Ces réseaux sont composés de capteurs autonomes capables de surveiller différentes conditions physiques telles que la température, la pression, les vibrations et bien d'autres paramètres.

Malgré ces avancées, plusieurs défis persistent, notamment en matière d'optimisation de l'énergie, de durée de vie du réseau, de gestion des nœuds et de tolérance aux pannes. Pour répondre à ces problématiques, divers protocoles de routage ont été développés, mettant en avant des stratégies basées sur l'hétérogénéité des capteurs pour améliorer la gestion des ressources énergétiques.

Dans ce travail, nous nous concentrerons sur le routage hiérarchique, qui s'avère être une solution efficace pour réduire la consommation d'énergie au sein des RCSFs. Ce type de routage repose sur la formation de clusters, où certains nœuds, disposant d'une énergie plus élevée, sont désignés comme chefs de cluster pour traiter et transmettre les données, tandis que les autres nœuds se limitent à la détection et à l'envoi des informations. Cette approche permet une gestion optimisée de l'énergie et prolonge ainsi la durée de vie du réseau.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au routage hiérarchique dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF), en mettant particulièrement l'accent sur les protocoles DEEC (DistributedEnergy Efficient Clustering), DDEEC (Developed DEEC), EDEEC (Enhanced DEEC) et TDEEC (Threshold DEEC). Ces protocoles, largement utilisés dans les RCSFs hétérogènes, ont été développés pour optimiser la gestion de l'énergie et prolonger la durée de vie du réseau.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres:

- ✓ Le premier chapitre présente les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques, leurs architectures et quelques-uns de leurs domaines d'application. Nous y abordons également les principaux défis liés à leur utilisation.
- ✓ Le deuxième chapitre est consacré aux protocoles de routage utilisés dans les RCSFs. Nous y expliquons leur classification et les critères distinctifs permettant de différencier chaque type de protocole.
- ✓ Le troisième chapitre se concentre sur le routage hiérarchique, avec une étude approfondie des protocoles DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC. Nous y analysons leur fonctionnement, leurs caractéristiques et leurs améliorations successives.
- ✓ Le quatrième chapitre est dédié à l'implémentation et la simulation des protocoles étudiés. Nous comparons leurs performances en termes de consommation énergétique, durée de vie du réseau et efficacité de transmission des données.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale, résumant les principaux résultats obtenus et proposant des perspectives d'amélioration pour ces protocoles.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

1.1 Introduction

Avec l'essor des technologies de l'information et des communications, une nouvelle génération de réseaux informatiques et de télécommunications a vu le jour : les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Ces réseaux se distinguent par leur capacité à surveiller et collecter des données environnementales en temps réel à l'aide de capteurs autonomes. Les RCSFs sont constitués de nœuds capteurs aux ressources limitées en termes de capacité de calcul, de stockage et d'énergie, ce qui pose plusieurs défis en matière de gestion et d'optimisation des performances.

Dans ce chapitre, nous présenterons les RCSFs, en détaillant leurs architectures, leurs principales caractéristiques, ainsi que la structure et le rôle d'un nœud capteur. Nous explorerons également les différents domaines d'application de ces réseaux, avant d'aborder les défis majeurs liés à leur déploiement et à leur fonctionnement.

1.2 Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs)

1.2.1 Définition d'un Réseau de Capteurs

Un réseau de capteurs est une infrastructure de détection et de communication composée de nœuds capteurs capables de collecter, traiter et transmettre des informations sur leur environnement. Ces réseaux offrent aux administrateurs – qu'ils soient civils, gouvernementaux, commerciaux ou industriels – la possibilité d'observer, d'analyser et de réagir en fonction des événements détectés. L'environnement surveillé peut être un espace physique, un système biologique ou une infrastructure informatique, selon les besoins de l'application.[1]

1.2.2 Définition d'un Réseau de Capteurs Sans Fil

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est une extension de cette technologie, reposant sur une communication sans fil entre les capteurs, qui sont répartis spatialement pour surveiller diverses conditions physiques ou environnementales (température, humidité, pression, vibrations, etc.). Ces réseaux fonctionnent de manière autonome et auto-organisée, sans infrastructure fixe.

Un élément clé des RCSFs est la Station de Base (SB), ou Sink, qui sert de passerelle entre les capteurs et le monde filaire (réseau Internet ou infrastructure informatique). La communication dans ces réseaux est assurée par différents protocoles sans fil, sélectionnés en fonction des exigences spécifiques de l'application. Parmi les normes les plus courantes,

on trouve IEEE 802.15.4 (utilisé notamment pour Zigbee), IEEE 802.11 (Wi-Fi) ainsi que des protocoles propriétaires fonctionnant sur des bandes de fréquence comprises entre 900 MHz et 1900 MHz. Ces réseaux jouent un rôle crucial dans de nombreux domaines, notamment la surveillance environnementale, la santé, l'industrie, la sécurité et les applications militaires, grâce à leur capacité à fonctionner dans des environnements variés et souvent contraignants.

1.2.3 Architecture d'un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF)

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (**RCSF**) est composé de plusieurs éléments interconnectés permettant la surveillance et la transmission des données. Il se structure principalement autour de trois composants essentiels : les nœuds capteurs, le sink (station de base) et le centre de traitement des données.

1.2.3.1 Nœud Capteur

Un nœud capteur est un dispositif électronique compact chargé de détecter et mesurer des paramètres environnementaux. Il est généralement constitué des éléments suivants :

- Un processeur pour traiter les données collectées.
- Une mémoire pour le stockage temporaire des informations.
- Un émetteur/récepteur radio pour assurer la communication sans fil.
- Un ensemble de capteurs adaptés aux besoins spécifiques du réseau (température, humidité, vibrations, etc.).
- Une source d'alimentation, généralement une pile ou une batterie rechargeable.

Différents modèles de nœuds capteurs existent sur le marché, parmi lesquels on trouve, à titre d'exemple les unités MICAX et TelosBde Crossbow, qui sont largement utilisés dans les applications de RCSF.[2]

1.2.3.2 La base station (Sink)

Le Sink, ou station de base, joue un rôle central dans le RCSF en collectant les données transmises par les nœuds capteurs et en les acheminant vers un centre de traitement. Contrairement aux autres nœuds, il doit rester constamment actif, car les informations arrivent de manière aléatoire. Pour cette raison, il est souvent alimenté en énergie de manière continue afin d'éviter toute interruption de service.

Dans les réseaux de grande envergure, plusieurs sinks peuvent être déployés pour équilibrer la charge et optimiser la transmission des données. Il existe trois types principaux de sinks :

1. Un nœud intégré au réseau, fonctionnant comme les autres nœuds capteurs.

2. Un dispositif externe, agissant comme une entité indépendante en dehors du réseau.
3. Une passerelle vers un autre réseau, facilitant l'accès aux infrastructures existantes, telles qu'Internet.[1]

1.2.3.3 Le Centre de Traitement des Données

Le centre de traitement des données est l'unité responsable de l'analyse et de l'exploitation des informations collectées. Une fois les données reçues du sink, elles sont filtrées, analysées et stockées pour en extraire des informations pertinentes.

Dans certains cas, ce centre peut être éloigné du réseau de capteurs, nécessitant alors une passerelle entre le sink et le réseau de transmission pour adapter le format des données au canal de communication utilisé. Ce traitement permet d'assurer une transmission efficace et sécurisée des informations vers les utilisateurs finaux ou les systèmes d'analyse avancés.

Cette architecture modulaire permet aux RCSFs d'être flexibles, évolutifs et adaptés à diverses applications comme la surveillance environnementale, la gestion industrielle ou encore les applications médicales et militaires.[3]

1.2.4 Principales caractéristiques d'un nœud capteur sans fil

1.2.4.1 Faible Coût

Dans un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF), des centaines voire des milliers de nœuds capteurs sont déployés pour surveiller un environnement donné. Afin d'optimiser les coûts de déploiement et de maintenance, chaque nœud capteur doit être conçu avec des composants à faible coût tout en garantissant des performances acceptables.[1]

1.2.4.2 L'Efficacité Énergétique

L'énergie est une ressource critique dans un RCSF, utilisée principalement pour le calcul, la communication et le stockage des données. Parmi ces fonctions, la communication est la plus énergivore. Comme les nœuds sont souvent alimentés par des batteries non rechargeables, l'optimisation de la consommation énergétique est essentielle. Les protocoles et algorithmes doivent donc être conçus pour minimiser l'usage de l'énergie et prolonger la durée de vie du réseau.[1]

1.2.4.3 La Capacité de Calcul

Les nœuds capteurs disposent de ressources de calcul limitées en raison des contraintes énergétiques, d'espace d'encombrement et de coût. Par conséquent, ils exécutent généralement des opérations de traitement simples, laissant les tâches plus complexes aux stations de base ou aux serveurs distants.[1]

1.2.4.4 La Capacité de Communication

Les RCSFs utilisent des ondes radio pour assurer la communication entre les nœuds capteurs sur un canal sans fil. Ces communications se font généralement sur de courtes distances, avec une bande passante restreinte et des conditions de transmission dynamiques. Selon l'application, le canal peut être unidirectionnel ou bidirectionnel. Étant donné que les RCSFs évoluent souvent dans des environnements hostiles et non surveillés, la robustesse, la sécurité et la résilience des protocoles de communication doivent être prises en compte pour assurer un fonctionnement fiable.[3]

1.2.4.5 La Sécurité et Confidentialité

Chaque nœud capteur doit être équipé de mécanismes de sécurité avancés pour empêcher les accès non autorisés, les attaques malveillantes et les altérations de données. De plus, pour garantir la confidentialité des informations sensibles, des protocoles de chiffrement et d'authentification doivent être intégrés au réseau.[4]

1.2.4.6 Détection et Traitement Distribués

Les nœuds capteurs sont déployés de manière uniforme ou aléatoire au sein du réseau. Chaque nœud est capable de collecter, traiter et agréger des données avant de les transmettre à la station de base (BS). Grâce à ce fonctionnement distribué, le réseau assure une meilleure fiabilité, évolutivité et robustesse face aux pannes ou aux changements de l'environnement.[1]

1.2.4.7 Topologie Dynamique du Réseau

Les RCSFs sont des réseaux dynamiques où la topologie évolue constamment. Un nœud capteur peut devenir inactif en raison d'une panne d'énergie, d'une défaillance matérielle ou d'interférences. De nouveaux nœuds peuvent également être ajoutés au réseau, modifiant ainsi sa structure. Pour assurer un fonctionnement optimal, les nœuds doivent être capables de s'auto-configurer et de s'adapter aux changements en temps réel.[1]

1.2.4.8 Auto-organisation

Les nœuds capteurs doivent pouvoir s'auto-organiser après leur déploiement, en particulier lorsqu'ils sont placés aléatoirement dans un environnement non surveillé. Grâce à des

algorithmes distribués, ils collaborent pour former et maintenir une infrastructure réseau stable sans intervention humaine.[5]

1.2.4.9 Communication Multi-Hop

Étant donné le grand nombre de nœuds capteurs dans un RCSF, la communication directe avec la station de base est souvent impossible. Le routage multi-sauts permet alors de relayer les messages via des nœuds intermédiaires, garantissant une transmission efficace des données sur de longues distances.[6]

1.2.4.10 Applications

Les RCSFs se distinguent des réseaux conventionnels par leur adaptabilité à diverses applications. Ils sont largement utilisés dans des domaines stratégiques tels que la défense militaire, la surveillance environnementale et la santé. Leur déploiement varie en fonction des besoins spécifiques de chaque application.[1]

1.2.4.1.1 Robustesse et Tolérance aux Pannes

Les nœuds capteurs étant souvent déployés dans des environnements hostiles, ils doivent être robustes et tolérants aux pannes. Ils doivent être capables de s'autotester, s'auto-étalonner et s'auto-réparer pour garantir la continuité des opérations malgré d'éventuelles défaillances.[1]

1.2.4.1.2 Taille Réduite et Contraintes Énergétiques

Les nœuds capteurs sont généralement de petite taille, limitant ainsi leur capacité énergétique et leur puissance de communication. Cette contrainte impose l'adoption de protocoles optimisés pour prolonger leur autonomie et maximiser leur efficacité.[3]

1.2.5 Architecture matériel d'un nœud capteur :

L'architecture matérielle d'un nœud capteur (ou nœud de capteur sans fil) se compose généralement des éléments suivants :

1.2.5.1 Unité de détection (capteur) :

Capte des informations physiques (température, lumière, pression, etc.) et les convertit en signaux électriques.[1]

1.2.5.2 Microcontrôleur (unité de traitement) :

Traite les données des capteurs, exécute les algorithmes de contrôle et gère les communications.[2]

1.2.5.3 Module de communication :

Permet la transmission des données vers d'autres nœuds ou une station de base (via RF, ZigBee, Bluetooth, etc.).[7]

1.2.5.4 Source d'énergie :

Généralement une batterie ou un système de récupération d'énergie (ex : solaire), alimente le nœud.[8]

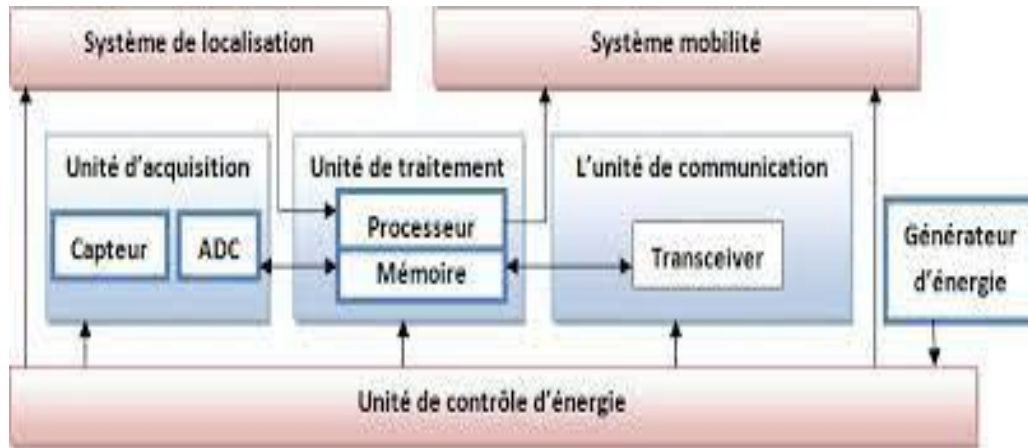


Figure1.1 : les composants d'un Nœud capteur[9]

1.3 La Pile Protocolaire (Modèle en couches)

La pile protocolaire est une architecture en couches où chaque couche utilise les services de la couche inférieure et fournit des services à la couche supérieure. Chaque couche utilise des protocoles qui définissent les règles de communication.[1]

Cette pile permet de standardiser la communication entre les composants d'un réseau pour garantir l'interopérabilité entre matériels et logiciels de différents constructeurs. Elle est composée de cinq couches fonctionnelles (application, transport, réseau, liaison de données, physique) et de trois plans de gestion :

- **Plan de gestion des tâches** (répartition des fonctions entre les nœuds),
- **Plan de gestion de la mobilité** (suivi de la position des nœuds),
- **Plan de gestion de l'énergie** (optimisation de la consommation énergétique).[1]

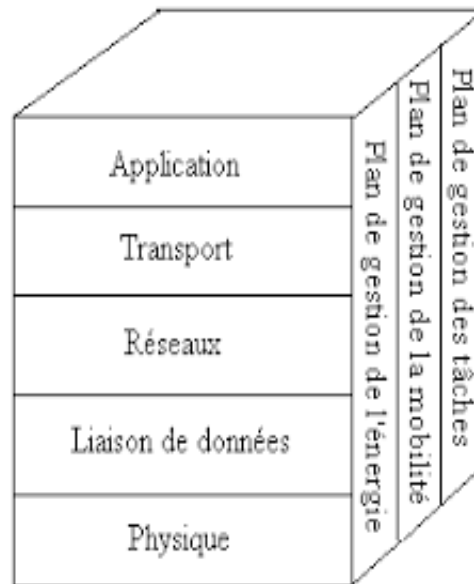


Figure1. 2 : La pile Protocolaire dans Les RCSFs[9]

1.3.1 La couche physique :

Définit les aspects matériels comme les fréquences porteuses et les caractéristiques des Gère l'envoi des données sur un lien direct entre deux nœuds (liaison point à point ou multipoint), tout en assurant le contrôle d'erreurs, l'accès au média et le multiplexage, transmissions radio.

1.3.2 La couche liaison de données :

Gère l'envoi des données sur un lien direct entre deux nœuds (liaison point à point ou multipoint), tout en assurant le contrôle d'erreurs, l'accès au média et le multiplexage.

1.3.3 La couche réseau :

Ce couche s'occupe du routage des données depuis les nœuds capteurs jusqu'à la station de base ("sink"). Ce routage doit être énergétiquement efficace et adapté aux contraintes spécifiques des réseaux de capteurs (absence d'adressage global, redondance des données, flux depuis plusieurs sources vers un même puits).

1.3.4 La couche transport :

Assure la **transmission fiable des données**, le contrôle de flux, le découpage en paquets et la gestion des erreurs de transmission.

1.3.5 La couche application :

Fournit une **interface entre le réseau et l'utilisateur**, permettant aux logiciels de collecter ou d'envoyer des données selon les besoins de l'application.

1.4 Domaines d'application des réseaux capteur sans fils

Un domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) désigne un secteur spécifique dans lequel ces réseaux sont utilisés pour surveiller, mesurer ou automatiser des phénomènes physiques ou environnementaux à l'aide de nœuds capteurs interconnectés. Ces domaines exploitent les capacités des RCSF pour collecter, transmettre et traiter des données en temps réel, souvent dans des environnements difficiles d'accès ou nécessitant un suivi continu.

Les domaines d'application varient selon les besoins : surveillance environnementale, militaire, santé, industrie, agriculture, transport, etc...[1]

1.4.1 Environnement

- **Surveillance des forêts** : détection précoce d'incendies grâce à des capteurs de température et de fumée.
- **Suivi de la qualité de l'air** : mesure des particules fines (PM2.5), CO₂, NO₂ dans les zones urbaines.
- **Détection de glissements de terrain** : capteurs d'humidité et de mouvement dans les zones à risque.

1.4.2 Santé

- **Télesurveillance médicale** : capteurs portables mesurant le rythme cardiaque, la température, la tension artérielle.
- **Chambres intelligentes** : détection de chute pour les personnes âgées.
- **Bracelets intelligents** : suivi en temps réel des signes vitaux pour les patients chroniques.

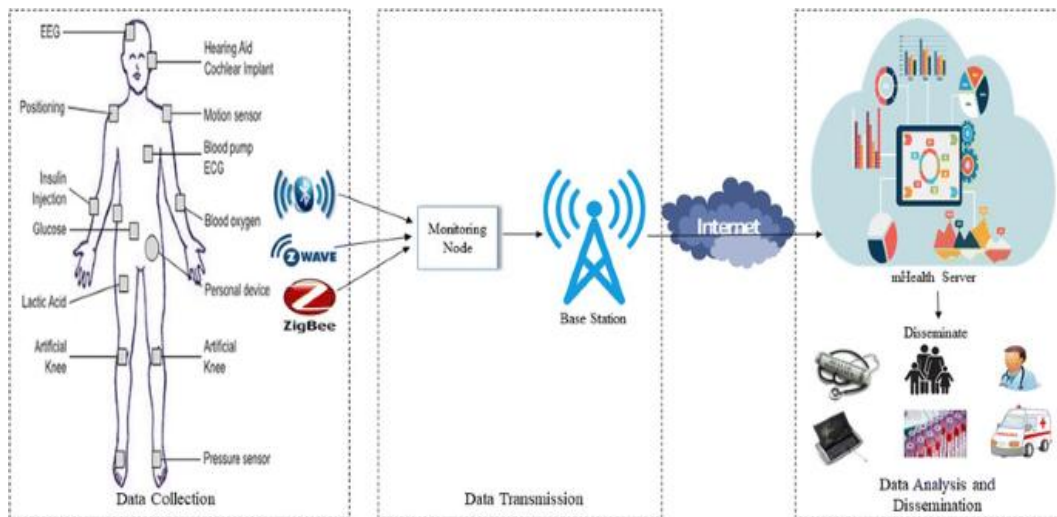


Figure 1.3: Réseau Capteur sans Fil Santé[9]

1.4.3 Industrie

- **Maintenance prédictive** : capteurs sur machines pour surveiller vibrations, température, pression.
- **Surveillance de pipelines** : détection de fuites ou de corrosion.
- **Usines intelligentes (Industrie 4.0)** : automatisation et suivi des processus de production.

1.4.4 Agriculture

- **Irrigation intelligente** : déclenchement automatique de l'arrosage selon l'humidité du sol.
- **Surveillance des cultures** : détection de maladies via des capteurs de température et de croissance.
- **Suivi du bétail** : capteurs GPS et biologiques pour surveiller l'état et la localisation des animaux.

1.4.5 Domotique et bâtiments intelligents

- **Systèmes de sécurité** : capteurs de mouvement et d'ouverture pour détecter les intrusions.
- **Gestion énergétique** : régulation automatique du chauffage/climatisation en fonction de la présence.
- **Éclairage intelligent** : ajustement de l'intensité selon la lumière ambiante et la présence.

1.4.6 Transport

- **Feux de circulation intelligents** : capteurs de trafic pour optimiser la fluidité.
- **Stationnement intelligent** : détection des places libres et guidage des conducteurs.
- **Surveillance ferroviaire** : capteurs sur les rails pour détecter les fissures ou anomalies.

1.4.7 Militaire et sécurité

- **Détection de mouvements ennemis** dans des zones sensibles.
- **Surveillance des frontières** avec capteurs de vibration ou infrarouges.
- **Mines intelligentes** : capteurs pour surveiller la stabilité du terrain.

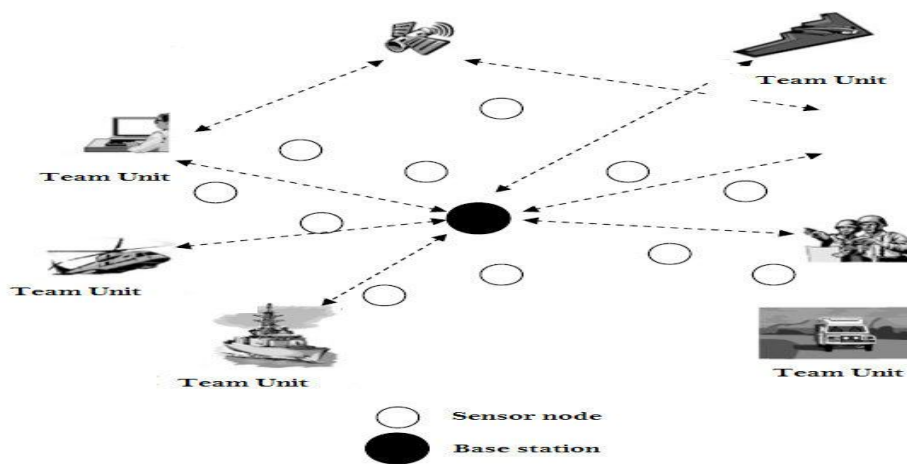


Figure1.4:Réseau Capteur sans Fil dans les applications Militaires.[9]

1.5 Systèmes d'exploitation pour les capteurs sans fil

Un système d'exploitation pour réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est un logiciel de base conçu spécialement pour gérer les ressources limitées (énergie, mémoire, puissance de calcul) des nœuds capteurs, tout en assurant la collecte, le traitement, la communication et la coordination des données entre les nœuds du réseau.

Il fournit une interface pour le développement d'applications, gère la communication entre les capteurs, et optimise la consommation d'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau.[10]

1.5.1 TinyOS

TinyOS est un système d'exploitation open source léger, conçu spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est basé sur un modèle événementiel et utilise un langage

spécifique appelé nesC. Il est optimisé pour les contraintes de faible consommation d'énergie, de mémoire limitée, et de traitement faible.[11]

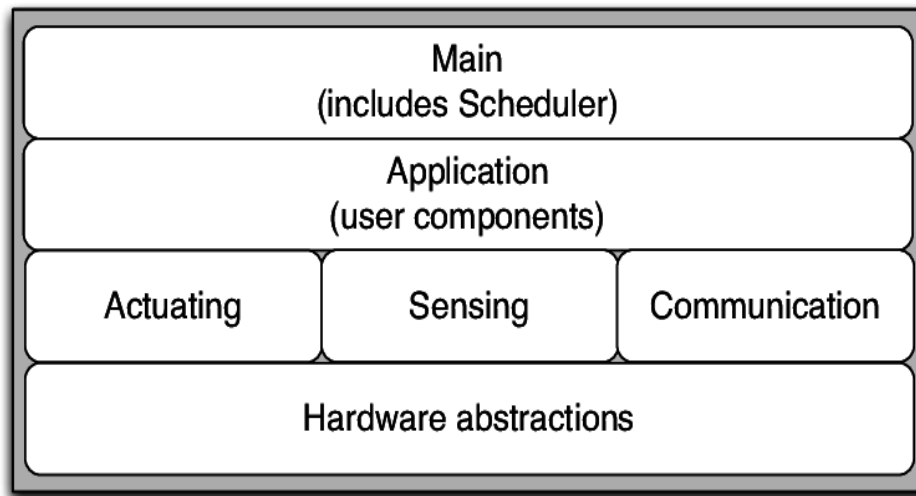


Figure1. 5: Architecture de TinyOs[9]

1.5.2 Contiki

Contiki est un système d'exploitation open source conçu pour les objets connectés et les capteurs sans fil. Il prend en charge les communications IP (6LoWPAN, RPL) et offre une gestion multitâche coopérative. Il est léger, modulaire et écrit en C.[12]

1.5.3 Riot OS

RiotOS est un système d'exploitation temps réel, open source, conçu pour l'Internet des objets et les capteurs. Il supporte le multithreading, une gestion efficace de l'énergie, et les protocoles de communication IoT (comme CoAP, RPL, 6LoWPAN).[13]

1.5.4 LiteOS

LiteOS es un système d'exploitation temps réel conçu pour les nœuds capteurs. Il offre une interface utilisateur de type Unix, la programmation à distance, et prend en charge les mises à jour dynamiques du code. Il est conçu pour la simplicité d'utilisation dans les réseaux distribués.[14]

1.5.5 MANTIS OS

MANTIS (MultimodalNetworkedTiny Operating System) est un système d'exploitation multitâche à thread léger, conçu pour faciliter la programmation et le développement sur les nœuds capteurs. Il est portable, et écrit en C.[15]

1.5.6 SOS

Le système d'exploitation SOS est conçu pour les nœuds capteurs de classe mote. Il se distingue par sa capacité à permettre la reconfiguration dynamique des logiciels embarqués pendant l'exécution.

Son architecture repose sur deux éléments :

- Un noyau statiquement compilé,
- Et des modules logiciels chargés dynamiquement, chacun exécutant une tâche précise (ex. : routage, pilote de capteur, etc.).

Les modules, indépendants les uns des autres, communiquent via des messages asynchrones ou des appels de fonctions. Chacun possède son propre espace mémoire alloué dynamiquement, ce qui favorise la modularité, la flexibilité et la mise à jour du système sans redémarrage.[16]

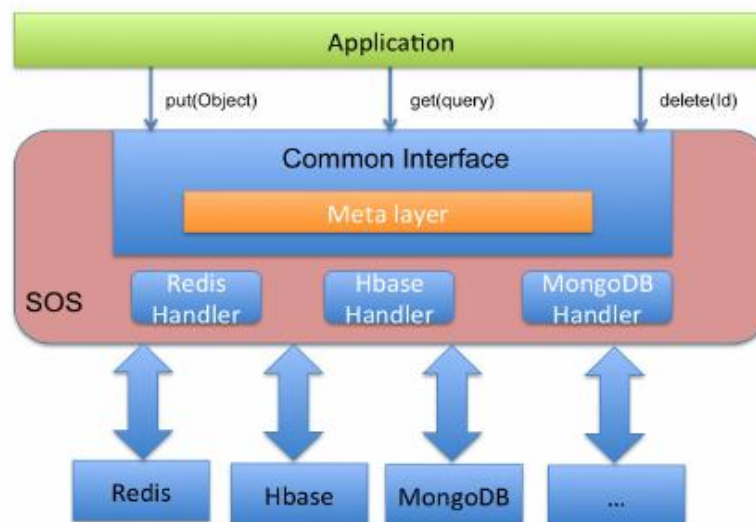


Figure1.6 : SOS Architecture.[9]

1.6 Problématiques liées aux RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil soulèvent un ensemble de problématiques techniques et fonctionnelles en raison de leurs caractéristiques propres : ressources limitées, déploiement dense et environnement souvent contraint.

Parmi les principales problématiques, on retrouve :

1.6.1 L'environnement de communication

Les nœuds de capteurs sans fil sont souvent déployés en très grande densité, et placés au plus près, voire à l'intérieur même du phénomène qu'ils doivent observer. Cette configuration leur

permet de collecter des données précises, mais elle implique qu'ils soient utilisés dans des environnements extrêmes, variés et souvent inaccessibles à l'homme.

Ils peuvent ainsi être installés dans des lieux aussi divers que :

- Des intersections urbaines achalandées,
- Des mécanismes industriels complexes,
- Le fond des océans ou la surface agitée des mers (ex : tornades),
- Des zones dangereuses ou contaminées chimiquement ou biologiquement,
- Des zones de guerre ou territoires ennemis,
- Des environnements domestiques ou industriels (grandes maisons, entrepôts),
- Attachés à des êtres vivants (animaux) ou à des véhicules mobiles,
- Immergés dans des cours d'eau ou des drains en mouvement.

Ces exemples soulignent que les capteurs doivent être capables de fonctionner dans des conditions extrêmement hostiles, telles que :

- Pressions extrêmes (fond marin),
- Températures extrêmes (arctique, moteurs d'avion),
- Interférences électromagnétiques intenses (brouillage ou environnement industriel).

Cette diversité d'environnements pose donc des défis majeurs en matière de robustesse, fiabilité, autonomie énergétique et résistance physique des capteurs, ainsi que dans la gestion des communications dans des contextes perturbés.[1]

1.6.2 L'énergie

Les nœuds de capteurs sans fil sont des dispositifs microélectroniques miniaturisés, dotés de sources d'alimentation très limitées (par exemple, des batteries de moins de 0,5 Ah à 1,2 V). Cette contrainte énergétique devient critique dans des environnements où le remplacement ou la recharge des batteries est impossible, comme dans les milieux inaccessibles ou hostiles.

Dans un réseau de capteurs sans fil multi-sauts, chaque nœud assure deux rôles fondamentaux:

- La collecte de données issues de son environnement,
- Et la transmission des données d'autres nœuds (fonction de routage).

Cela signifie que la défaillance d'un seul nœud, due par exemple à l'épuisement de sa batterie, peut avoir des conséquences structurelles majeures sur le réseau. Elle peut engendrer des changements topologiques, perturber la connectivité, et nécessiter des réorganisations dynamiques comme le réacheminement des paquets ou l'ajustement de la topologie.

Ainsi, la gestion efficace de l'énergie devient une problématique centrale dans la conception des réseaux de capteurs sans fil. Pour cela, les chercheurs s'efforcent de développer des protocoles et algorithmes intelligents, capables de :

- Minimiser la consommation énergétique,
- Étendre la durée de vie du réseau,
- Maintenir une performance de communication acceptable malgré les contraintes énergétiques.[1]

1.6.3 La topologie du réseau

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont souvent composés de centaines voire de milliers de nœuds capteurs, déployés dans des zones difficiles d'accès et généralement sans surveillance directe. Ces nœuds sont souvent exposés à des pannes fréquentes (épuisement énergétique, dysfonctionnement matériel, défaillance de communication), ce qui rend la maintenance du réseau particulièrement complexe.

I. F. Akyildiz et ses collaborateurs soulignent que la maintenance de la topologie dans un tel contexte représente un véritable défi. La grande densité de nœuds (jusqu'à 20 nœuds par mètre cube) et leur répartition rapprochée (à quelques mètres ou pieds de distance les uns des autres) exigent une gestion dynamique, autonome et adaptative de la structure du réseau.

Les principaux objectifs de cette maintenance sont :

- Préserver la connectivité globale du réseau malgré les défaillances,
- Réorganiser dynamiquement les routes de communication en cas de panne,
- Optimiser l'utilisation des ressources, notamment énergétiques, afin d'éviter l'isolement de certains nœuds.

Face à ces contraintes, des mécanismes intelligents de gestion de la topologie doivent être intégrés, permettant au réseau de s'auto-configurer, de s'auto-réparer, et de rester fonctionnel sans intervention humaine.[1]

1.6.4 La tolérance aux fautes

Dans un réseau de capteurs sans fil, les défaillances de nœuds sont fréquentes. Elles peuvent survenir pour plusieurs raisons :

- Epuisement de la batterie,
- Dégradation matérielle (panne physique),
- Ou interférences dans les communications (bruit, brouillage).

Toutefois, l'architecture des RCSF est conçue pour que de telles pannes locales n'affectent pas le fonctionnement global du réseau. C'est ce que l'on appelle la tolérance aux fautes.

Cette propriété désigne la capacité du réseau à continuer à fonctionner normalement même lorsqu'un ou plusieurs capteurs deviennent défaillants. Elle repose sur plusieurs mécanismes :

- Redondance des nœuds : plusieurs capteurs peuvent surveiller une même zone ou phénomène.
- Routage alternatif : si un chemin de communication est coupé, les données peuvent emprunter un autre chemin.
- Auto-organisation : le réseau peut se reconfigurer dynamiquement pour contourner les zones défaillantes.

La tolérance aux fautes est donc essentielle pour assurer la fiabilité, la robustesse et la durée de vie des réseaux de capteurs, notamment dans des environnements critiques ou inaccessibles.[1]

1.6.5 L'échelle

Dans les réseaux de capteurs sans fil, l'échelle est une contrainte majeure. Le nombre de nœuds peut atteindre des centaines de milliers voire un million, ce qui génère un fort volume de communications inter-nœuds. Cette densité nécessite que le nœud collecteur (sink) soit capable de gérer une grande quantité de données, impliquant une mémoire et une capacité de traitement élevées.[1]

1.6.6 Les coûts de production

Dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), le coût de production des nœuds capteurs est un facteur déterminant, surtout en raison du grand nombre de nœuds nécessaires. Pour rester économiquement compétitifs face aux systèmes de surveillance traditionnels, le coût d'un nœud capteur est généralement inférieur à 1 \$, ce qui est nettement plus bas que celui d'un nœud Bluetooth, estimé à environ 10 \$.[1]

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé de manière concise les principes fondamentaux des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ces réseaux se distinguent par des caractéristiques uniques telles qu'une consommation énergétique minimale, une grande scalabilité, et des contraintes de communication spécifiques, qui les différencient nettement des réseaux classiques.

Ces particularités imposent le développement de protocoles adaptés — notamment pour le routage, la sécurité, le transport des données, ainsi que les applications elles-mêmes.

L'ensemble de ces défis techniques et fonctionnels nécessite des solutions innovantes et spécifiques aux environnements contraints des RCSF.

Ces aspects feront l'objet du chapitre suivant, où nous aborderons en détail les protocoles conçus pour répondre aux exigences propres aux RCSF.

Chapitre 2

Les protocoles de routage pour un réseau

de capteurs sans fil

2.1 Introduction

L'objectif principal d'un protocole de routage pour un réseau de capteurs sans fil est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de nœuds afin que des messages puissent être acheminés. Le protocole de routage permet aux nœuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers un point de collecte [17]

Ce chapitre est structuré comme suit : d'abord, nous présenterons les protocoles de routage ainsi que leurs caractéristiques leur classification au sein des RCSFs, ainsi que les particularités qui permettent de les distinguer

2.2 Les protocoles de routages :

Le problème de routage consiste à déterminer une méthode d'acheminement optimal pour transmettre le message de l'émetteur au destinataire. Dans le contexte des réseaux de capteurs, l'efficacité énergétique du routage est primordiale. Il est donc essentiel de trouver un trajet qui ne demande pas trop d'énergie, un trajet qui n'est pas trop long. Cependant, il est également nécessaire de pouvoir localiser ou entretenir les chemins sans consommer trop d'énergie.[17]

Dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, les spécificités de ces dispositifs font du routage une question cruciale. Effectivement, l'importante densité de nœuds, leurs capacités énergétiques restreintes et la configuration qu'ils établissent, requièrent des protocoles de routage dédiés, distincts de ceux utilisés dans les réseaux conventionnels.[18]

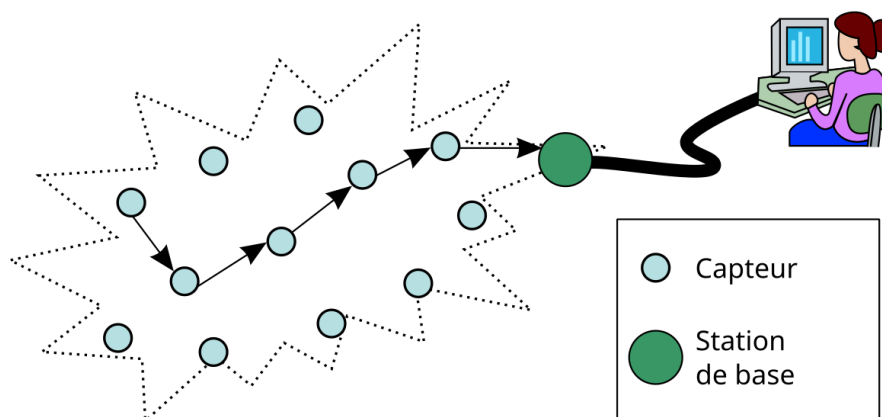


Figure 2.1 Exemple d'un protocole de routage[18]

2.3 L'objectif du protocole de routage :

L'objectif de protocole de routage peut se résumer en cinq points :

- Découvrir dynamiquement les routes vers les sous réseaux d'un réseau et les inscrire dans une table de routage ;
- S'il existe plusieurs routes vers un sous réseau, inscrire la route la meilleure (la plus courte) ;
- Détecter les routes qui ne sont plus valides et les supprimer de la table ; si le réseau dont le chemin est supprimé peut-être accédé par le biais d'un autre routeur, inscrire ce nouveau chemin dans la table en remplacement du chemin supprimé ;
- Ajouter le plus rapidement possible de nouvelles routes, ou mettre à jour le plus vite possible les routes considérées comme meilleures : le temps qui s'écoule entre la perte d'une route et la découverte d'une autre route s'appelle le temps de convergence,
- Empêcher les boucles de routage.[19]

2.4 Classification des protocoles de routage pour RCSF

La figure 2.2 ci-dessous résume une classification qui se base sur quatre critères : la topologie du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement de la route le paradigme de communication et le modèle de livraison :

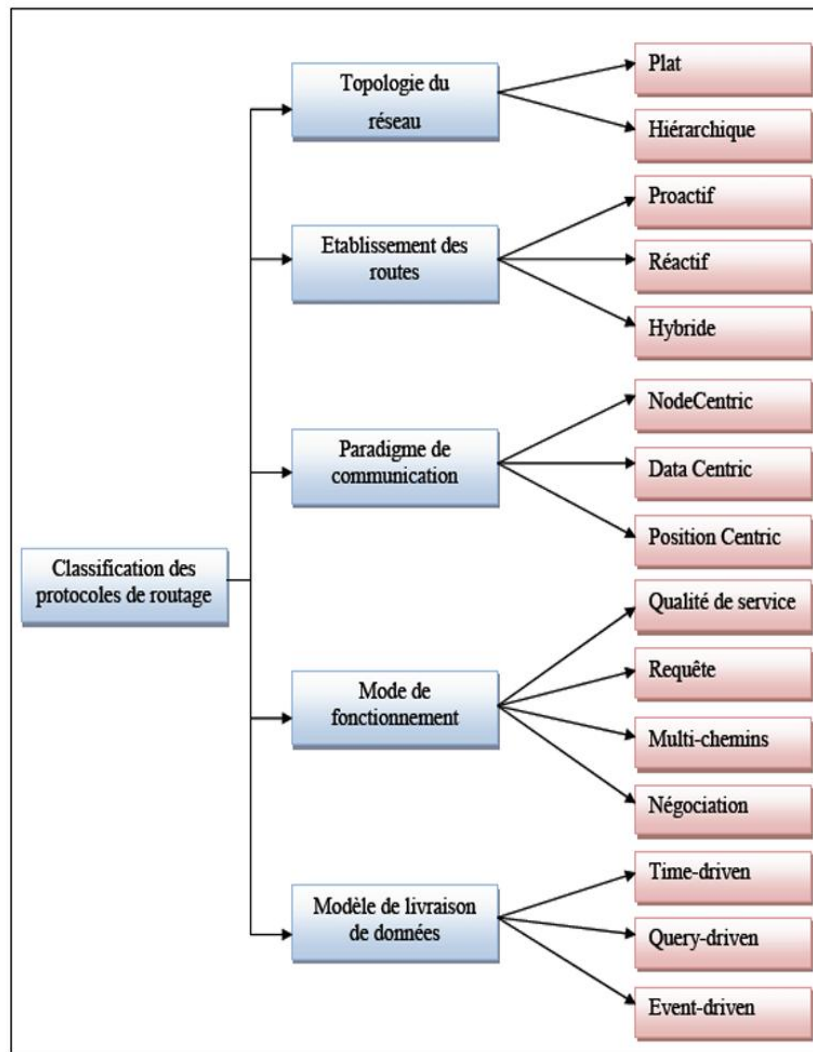


Figure 2. 2 Classification des protocoles de routage pour RCSF[20]

2.4.1 Selon la topologie du réseau

On peut diviser les protocoles de routage qui s'appuient sur la configuration du réseau en trois groupes : les protocoles plats, les protocoles hiérarchiques et ceux basés sur la géographie.

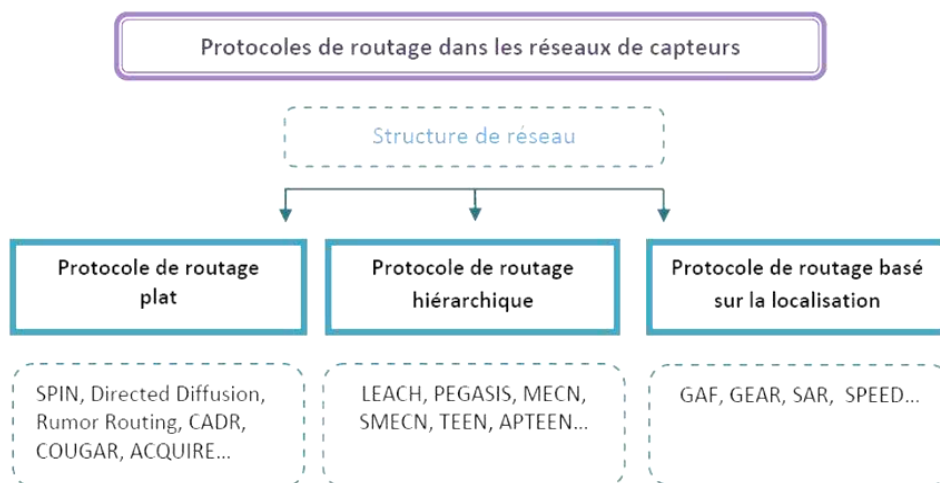


Figure 2. 3 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la Topologie du réseau [21]

2.4.1.1 Le routage plat

Ce routage centré sur les données, est le modèle le plus simple où chaque nœud dans le réseau transmet les données à la station de base. Chaque nœud joue typiquement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent entre eux pour accomplir la même tâche. La station de base envoie des requêtes à certaines régions et se met en attente des données des capteurs situés dans les régions choisies. Parmi les protocoles de cette catégorie [19]:

- **Le protocole SPIN** :Le protocole SPIN Heinzelman et al. [20] ont proposé une famille de protocoles appelée SPIN (SensorProtocols for Information via Negotiation), reposant sur un modèle de négociation afin de propager l'information dans un réseau de capteurs. Le but de SPIN est de pallier aux problèmes de l'inondation, qui sont : L'implosion due à la duplication inutile des réceptions d'un même message Le chevauchement lié au déploiement dense des capteurs. En utilisant l'inondation, les capteurs d'une zone émettront tous la même donnée (ou presque). L'ignorance des ressources, car d'inondation ne prend pas en considération les ressources des nœuds[20].

Ces trois problèmes affectent grandement la durée de vie et les performances du réseau. Pour les résoudre, SPIN adopte deux principes la négociation : pour éviter le problème d'implosion, SPIN précède l'émission d'une donnée par sa description, en utilisant la notion de méta-données et le récepteur aura le choix par la suite d'accepter la donnée ou non. [21]

Ce mécanisme permet aussi de régler le problème de chevauchement. L'adaptation aux ressources : d'une manière continue, les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie. Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l'énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud. [21]

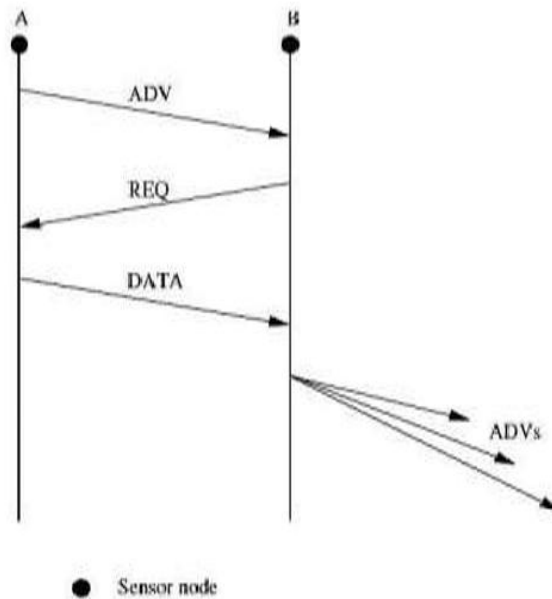


Figure 2.4 : SPIN Protocole[20]

Les communications dans SPIN se font en trois étapes [23] :

- ✓ Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- ✓ Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- ✓ En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.
- **DD (Directed Diffusion)** : est un protocole de propagation de données, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. Le puits diffuse un intérêt sous forme de requête, afin d'interroger le réseau sur une donnée particulière. Il se base sur le modèle publish/subscribe. des gradients, propagation des données et renforcement des chemins.[21]

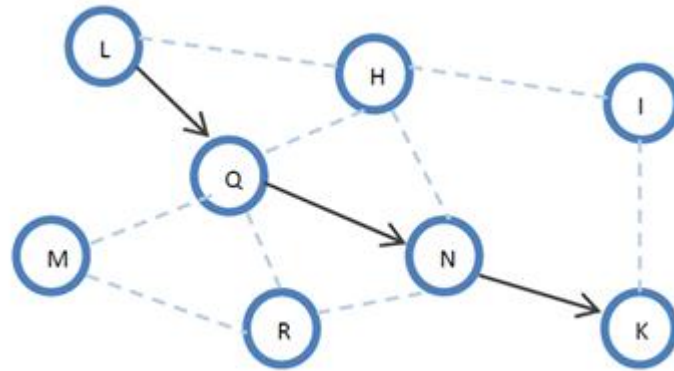


Figure 2.5 Routage plat (flat based-routing).[19]

2.4.1.2 Le routage basé sur la localisation

Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations. L'idée des protocoles de routage géographique est d'utiliser des informations géographiques pour acheminer les paquets. Pour simplifier la présentation pour la maintenance ainsi que pour le transfert de données. Ce type de protocoles, chaque nœud du réseau connaît sa position et celle de ses voisins. Le positionnement du nœud peut être obtenu en utilisant un système géo-positionnement tel que le GPS ou bien via des algorithmes de positionnement relatif. Il peut donc calculer sa distance et celle de ses voisins à la destination et envoie l'information à son voisin qui le rapproche le plus de la destination finale.[25][26] Nous citons comme exemples de protocoles le MECN (Minimum Energy Communication Network) et GAF (Geographic Adaptive Fidelity).

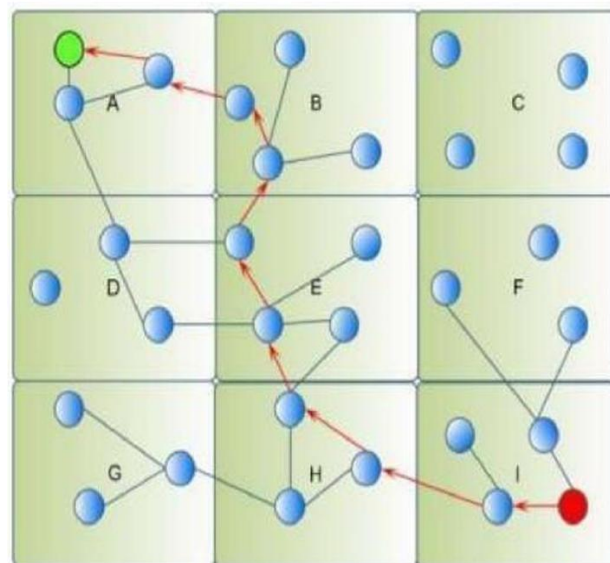


Figure 2.6 : Protocole de Routage avec Localisation Géographique[18]

2.4.1.3 Le routage hiérarchique

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique sur tout dans les réseaux de capteurs à grande échelle [23]. Il se base sur le concept (nœud simple -nœud maître) où les nœuds simples acheminent leurs messages à leur maître, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres nœuds maîtres jusqu'à l'aboutissement à la station de base. L'avantage principal de ce type de routage est l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages redondants transmis à la station de base, ce qui permet une meilleure conservation de l'énergie.

Comme exemples de protocoles de routage hiérarchique nous pouvons citer : LEACH (LowEnergy Adaptive ClusteringHierarchy) et PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems).

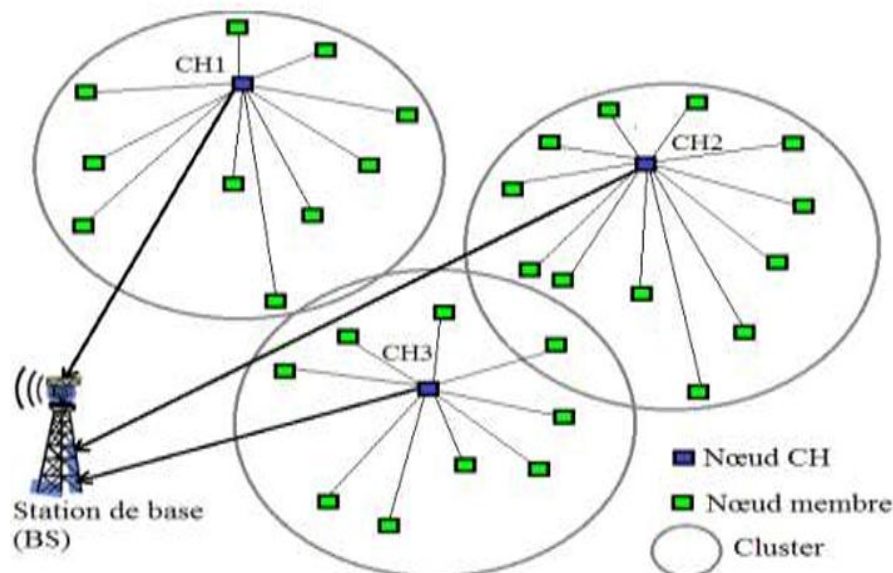


Figure 2.7 : Topologie hiérarchique.[23]

2.4.2 Selon l'établissement des routes. On distingue trois grandes catégories : proactifs, réactifs et hybrides :

2.4.2.1 Protocoles proactifs (Table-Driven)

Les protocoles proactifs maintiennent en permanence des tables de routage à jour sur chaque nœud, permettant une transmission rapide grâce à des chemins déjà connus. Ces mises à jour sont effectuées régulièrement, même en l'absence de trafic, à travers l'échange périodique de messages de contrôle diffusant l'état de la topologie du réseau. Bien qu'ils offrent une faible latence et une gestion simple de l'envoi des données, ils génèrent un important trafic de contrôle et une

consommation d'énergie élevée, ce qui peut poser problème dans les réseaux dynamiques ou de grande taille. [28]

2.4.2.2 Protocoles réactifs (On-Demand)

Les protocoles réactifs, ou "On Demand", découvrent les routes uniquement lorsqu'une communication est initiée, évitant ainsi le maintien constant d'un état de routage. Ils fonctionnent en diffusant une requête (RREQ) dans le réseau, suivie d'une réponse (RREP) des nœuds connaissant le chemin. Cette approche permet d'économiser de l'énergie en l'absence de trafic et convient aux réseaux à trafic irrégulier. Toutefois, elle entraîne une latence initiale plus élevée et peut provoquer une congestion due à l'inondation des requêtes. [29]

2.4.2.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les méthodes proactive et réactive pour bénéficier de leurs avantages respectifs. Le réseau est divisé en zones où les routes locales sont gérées de façon proactive, réduisant la latence, tandis que les routes vers des destinations éloignées sont établies à la demande, économisant ainsi de l'énergie. Cette approche offre un bon équilibre entre performance et efficacité, mais elle implique une mise en œuvre plus complexe et une surcharge de contrôle variable selon la taille des zones et le volume de trafic. [29]

2.4.3 Selon son fonctionnement :

2.4.3.1 Routage fondé sur la qualité de service

Le routage fondé sur la qualité de service (QoS) vise à équilibrer la consommation d'énergie et les exigences liées à la qualité des données, telles que la latence, la capacité de transmission ou encore la fiabilité. Ce type de protocole est particulièrement recommandé pour les réseaux de surveillance. en voici quelques exemples :[20]

- **Le protocole SAR** : utilise une gestion par table multi-chemins pour optimiser l'efficacité énergétique et renforcer la résilience aux erreurs. Il crée des arbres de routage en tenant compte de la qualité de service (QoS), de l'énergie disponible sur chaque chemin et de l'importance des paquets. Plusieurs routes sont ainsi établies entre les capteurs et le Sink, et l'itinéraire choisi dépend des ressources énergétiques et des exigences de QoS. Le protocole conserve ainsi plusieurs trajectoires possibles vers le Sink pour s'adapter aux conditions du réseau.[20]
- **Le protocole SPEED** : repose sur une diffusion géographique et exige que chaque nœud conserve des informations sur ses voisins. Il vise à maintenir une vitesse minimale de transmission pour chaque paquet, permettant aux applications d'estimer le temps de transit avant l'admission. Ce mécanisme aide également à éviter la congestion en cas de surcharge du réseau.

2.4.3.2 Routage fondé sur les requêtes

Dans cette forme de routage, un nœud crée des requêtes pour poser des questions aux capteurs. Ces demandes sont formulées soit à travers un schéma valeur-attribut, soit en employant un langage dédié. Les nœuds possédant les informations nécessaires doivent les transmettre au nœud requérant en suivant le trajet inverse de la demande (par exemple : SPIN, Directed Diffusion, Rumor routing, COUGAR,...)[30].

2.4.3.3 Routage fondé sur le multi-chemin

Dans cette classe, les protocoles de routage exploitent des itinéraires multiples pour améliorer la performance du réseau. On peut évaluer la fiabilité d'un protocole en fonction de son aptitude à découvrir des trajets secondaires entre l'origine et la destination lorsque le trajet principal est compromis (par exemple : SPIN, Directed diffusion, EAR...)[30].

2.4.3.4 Routage basé sur l'agrégation

Facilite la réduction du nombre d'envois de données identiques par divers nœuds voisins et distribue le traitement de ces données à chaque nœud pour leur acheminement vers la destination finale. Un nœud d'agrégation fusionne les données issues de plusieurs nœuds pour produire une information pertinente. Étant donné qu'un calcul requiert moins d'énergie qu'une transmission de données, on peut prolonger la longévité du dispositif en réduisant le volume des informations échangées (par exemple : SPIN, diffusion dirigée, SAR, routage de rumeurs, COUGAR, LEACH,...)[27].

2.4.3.5 Les protocoles de routage fondés sur les requêtes

L'acquisition des données concernant l'état de l'environnement est déclenchée par les requêtes émises par le nœud «Sink».

2.4.3.6 Les protocoles de routage fondés sur la négociation

Des données Ces procédures de routage ont abordé la question de la redondance des données. Avant de partager les informations, les nœuds procèdent à des négociations entre eux en utilisant des messages de négociation. L'issue de ce processus est la diffusion des données pertinentes, contribuant ainsi à l'allongement de la longévité du réseau.

2.4.4 Le Paradigme de Communication

Les protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil peuvent également être classés selon le paradigme de communication qu'ils adoptent.

- **Routage point à point** : Dans ce paradigme, la communication se fait directement entre deux nœuds (source et destination). Chaque capteur doit être capable d'envoyer des données à un autre capteur ou à la station de base via une route directe. Exemple de protocole : Directed Diffusion.
- **Routage point à multipoint** : Dans ce cas, un nœud source envoie des données à plusieurs destinataires. Cela est couramment utilisé dans les applications de diffusion. Exemple de protocole : Multipoint Relay.
- **Routage multipoint à multipoint** : Permet la communication entre plusieurs sources et plusieurs destinations, souvent utilisé dans les réseaux avec une communication de groupe ou pour l'agrégation de données. Exemple de protocole : Data-centric protocols.

2.4.5 Le Modèle de Livraison des Données[30]

Ce critère concerne la manière dont les données sont acheminées et livrées à leur destination dans le réseau.

- **Routage basé sur la demande** : La livraison des données se fait en réponse à une requête spécifique. Ce modèle est souvent utilisé dans des applications où l'interrogation des données est périodique ou conditionnelle. Exemple de protocole : Directed Diffusion, COUGAR (A Data-centric routing protocol).
- **Routage basé sur la publication** : Dans ce modèle, les capteurs publient de manière continue des données qui sont ensuite consommées par d'autres capteurs ou par une station de base. Exemple de protocole : LEACH.
- **Routage basé sur l'agrégation** : Les données provenant de plusieurs capteurs sont combinées ou agrégées avant d'être envoyées à la station de base pour réduire le volume de données et économiser l'énergie. Exemple de protocole : PEGASIS, LEACH.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur les divers protocoles de routage adaptés aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF), en mettant en évidence leur rôle essentiel dans l'optimisation de la communication et la gestion de l'énergie au sein de ces réseaux. À travers une classification structurée selon la topologie, le mode d'établissement des routes, le fonctionnement, le paradigme de communication et le modèle de livraison des données, nous avons pu distinguer les différentes approches qui répondent à des exigences spécifiques.

Les protocoles étudiés montrent que le choix d'un mécanisme de routage ne peut être universel, mais dépend étroitement des contraintes de l'application cible, telles que la densité du réseau, la mobilité, les ressources énergétiques disponibles et la qualité de service attendue. Qu'il s'agisse de routage plat, hiérarchique ou géographique, chaque solution vise à prolonger la durée de vie du réseau tout en assurant une transmission efficace et fiable des données.

Ainsi, une bonne compréhension de ces protocoles permet de concevoir des architectures réseau plus robustes, évolutives et économes en énergie, ce qui est fondamental pour le déploiement réussi des RCSF dans des environnements variés et contraints.

Chapitre3

Les protocoles de routage hétérogènes dans les réseaux de capteurs sans fil

3.1 Introduction :

Dans un réseau de capteurs sans fil, chaque nœud est en charge de recueillir l'information brute, de la traiter localement et de l'envoyer vers la station de destination. Dans un réseau homogène tous les nœuds capteurs sont considérés comme étant identiques lorsqu'ils sont dotés des mêmes ressources et lorsque leurs énergies initiales sont égales. Par contre, on parle de réseaux de capteurs hétérogènes lorsque les nœuds capteurs sont dotés d'équipements différents et/ou lorsque leurs énergies initiales sont différentes. Nous présentons dans ce chapitre le cas des réseaux de capteurs hétérogènes en nous basant sur les niveaux d'énergies initiales différentes.

3.2 Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil :

Il s'agit d'acheminer l'information dans le réseau d'un point source vers un point destination. Cet acheminement de l'information se fait par ondes radio. Des algorithmes de routage permettent d'optimiser les chemins pour les échanges d'information.

- **Le modèle d'énergie** : Il existe plusieurs équations permettant de modéliser les quantités d'énergie consommées par les nœuds capteurs lors d'émission et de réception de paquets de données. Ces dépenses énergétiques prennent en considération plusieurs paramètres dont le nombre de bits concernés, la distance de transmission ainsi que les dépenses énergétiques consommées par le matériel lui-même et les pertes dues aux traitements et aux stockages des données [31].

Parmi les modèles énergétiques ; nous avons adopté le suivant :

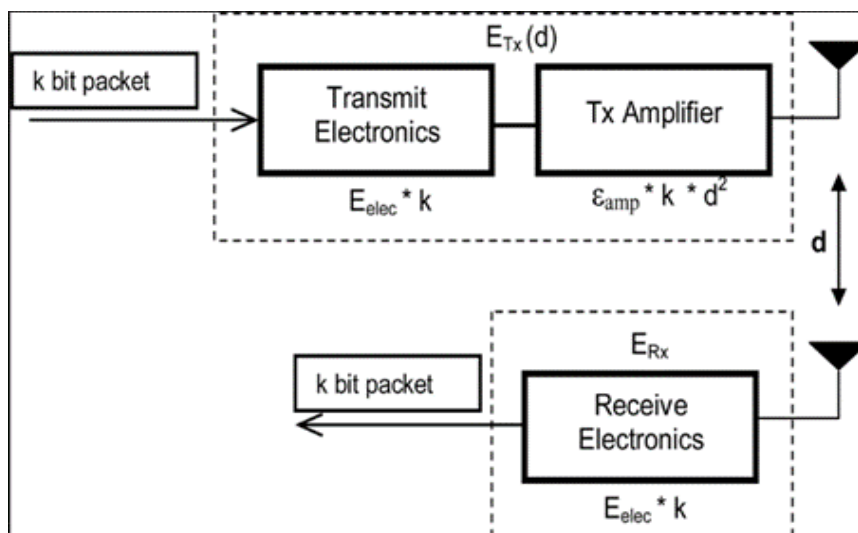


Figure 3.1 Le modèle d'énergie.

- Quantité d'énergie (en Joules) pour transmettre une donnée de k bits

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times E_{efs} \times d^2 & \text{if } dis < d_0 \\ k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^4 & \text{if } dis \geq d_0 \end{cases}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{amp}}}$$

- Quantité d'énergie (en Joules) pour la réception d'une donnée de k bits

$$E_{Rx}(k) = k \times (E_{elec} + E_{DA})$$

$E_{Tx}(k)$: est l'énergie consommée pour transmettre un paquet de k bits.

d : est la distance entre un nœud et son cluster-head, ou entre ce dernier et la station de base.[32]

E_{elec} , E_{amp} et E_{fs} : sont respectivement l'énergie requise par le circuit électronique, par l'amplificateur dans l'espace libre, et d_0 représente un seuil de distance.

$E_{Rx}(k)$: L'énergie de réception d'un paquet de k bits par le cluster-head (ou par la station de base).

E_{DA} : L'énergie de traitement d'agrégation des données.

3.3 Les réseaux hétérogènes

Un réseau de capteurs sans fil est dit hétérogène si tous ses capteurs n'ont pas les mêmes capacités de stockage, de traitement, d'autonomie de batterie, de détection et de communication. Dans ce travail, nous considérons seulement la contrainte énergétique ; les énergies initiales des batteries équipant les différents capteurs du réseau étant considérées différentes. De façon générale, il est admis de caractériser les capteurs selon leurs niveaux d'hétérogénéité. Les algorithmes de routage prennent en considération ces niveaux d'énergies pour configurer le réseau particulièrement pour les choix des cluster-heads qui nécessitent beaucoup plus d'énergie que le reste de nœuds capteurs du réseau.

3.3.1 Le modèle hétérogène

Considérons une zone d'intérêt dont la surface est L^2 . Supposons que cette surface est couverte par un ensemble de N nœuds capteurs aléatoirement ou régulièrement déployés au sein de cette surface. Il est possible de distinguer plusieurs types de nœuds capteurs dont les énergies initiales sont différentes et échelonnées à divers niveaux :

- Niveau 1 : Les nœuds dont l'énergie initiale est E_0
- Niveau 2 : Les nœuds dont l'énergie initiale est E_1
- Niveau 3 : Les nœuds dont l'énergie initiale est E_3
- Niveau 4 : Les nœuds dont l'énergie initiale est E_4
- Niveau 5 : Les nœuds dont l'énergie initiale est E_5
-

Avec $E_0 < E_1 < E_2 < E_3 < E_4 < E_5$

Selon les niveaux d'énergies composant les nœuds du réseau, on parlera de réseau homogène lorsque tous les nœuds du réseau ont une énergie initiale égale à E_0 et de réseau dont le niveau d'hétérogénéité est i lorsqu'il est composé de nœuds dont les énergies initiales sont comprises dans l'ensemble $\{E_0, \dots, E_{i-1}\}$ ($i > 0$).

Les nœuds dont l'énergie initiale est E_0 sont dits nœuds 'normaux' (Normal nodes), ceux dont les énergies initiales sont E_1 sont dits nœuds avancés (Advanced nodes), puis viennent les nœuds dont l'énergie est E_2 qui sont dits super-nœuds (Super nodes), puis les nœuds avec une énergie initiale égale à E_3 sont dits nœuds ultra supers (ultra super_nodes) et les nœuds avec une énergie initiale équivalente à E_4 sont dits nœuds extrêmes (Extremenodes).

Le tableau 3.1 résume cette répartition :

Niveaux	Réseau	Énergie initiale	Energie totale (pour N nœuds)	Energie excédentaire	Exemple
1	Homogène	E_0	$N.E_0$		LEACH
2	Hétérogène à 2 niveaux	$E_1 = E_0(1+a)$	$E_{total} = N.E_0(1+am)$	Am	DEEC
3	Hétérogène à 3 niveaux	$E_2 = E_0(1+b)$	$E_{total} = N.E_0(1+m(a+m_0(b-a)))$	$m(a+m_0(b-a))$	EDEEC
4	Hétérogène à 4 niveaux	$E_3 = E_0(1+c)$	$E_{total} = N.E_0(1+m(a+m_0(b-a)+m_1(c-b)))$	$m(a+m_0(b-a)+m_1(c-b))$	BEENISH
5	Hétérogène à 5 niveaux	$E_4 = E_0(1+d)$	$E_{total} = N.E_0(1+m(a+m_0(b-a)+m_1(c-b)+m_2(d-c)))$	$m(a+m_0(ba)+m_1(cb)+m_2(d-c))$	I-BEENISH

Table 3.1 Modèles de réseaux hétérogènes.

Plusieurs protocoles hétérogènes avec différents niveaux d'énergies ont été implémentés. Parmi ces protocoles, on peut citer les protocoles LEACH, DEEC, DDEEC, EDEEC, TDEEC, BEENISH, I-BEENISH et autres protocoles.

3.3.2 Le clustering

Le clustering est une méthode permettant d'organiser un réseau de capteurs sans fil (WSN) de manière hiérarchique afin d'optimiser la gestion de la charge de transmission. Chaque nœud communique exclusivement avec un chef de cluster. Ces chefs collectent et agrègent

les données provenant de plusieurs nœuds avant de les transmettre à d'autres chefs ou à un récepteur. L'objectif principal du clustering est de diviser le réseau en sous-graphes interconnectés, appelés clusters. En général, les algorithmes de clustering se déroulent en deux étapes :

- Phase 1 (élection du chef de cluster) : Les nœuds s'auto-élisent pour devenir chefs de cluster, tandis que les autres nœuds choisissent à quel chef de cluster ils vont se connecter.
- Phase 2 (maintien du cluster) : La structure du cluster peut être modifiée à cause de déplacements ou de défaillances de nœuds/chefs, entraînant un recalcul des clusters. Le clustering fait partie des techniques utilisées pour réduire la consommation énergétique

3.3.3 La classification des clusters distingue deux types de réseaux

les réseaux homogènes et les réseaux hétérogènes. Un réseau homogène est caractérisé par des nœuds de capteurs ayant des niveaux d'énergie initiaux similaires, tandis qu'un réseau hétérogène se compose de nœuds ayant des niveaux d'énergie initiaux différents. Les algorithmes dédiés aux réseaux sans fil homogènes comprennent LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems), et HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering). Ces protocoles ne tiennent pas compte des différences d'énergie entre les destinés aux réseaux hétérogènes sont DEEC (Distributed Energy-Efficient Clustering), DDEEC (Deec Développé), EDEEC (Deec Amélioré), TDEEC (Threshold DEEC), BEENISH (Balanced Energy Efficient Network Integrated Super Heterogeneous Network) et SEP (Stable Election Protocol). SEP est spécifiquement conçu pour les réseaux hétérogènes à deux niveaux, et ne fonctionne pas aussi bien pour des réseaux avec plus de deux niveaux d'hétérogénéité. Dans SEP, deux types de nœuds sont distingués : les nœuds normaux, à faible niveau d'énergie, et les nœuds avancés, à haut niveau d'énergie. Les protocoles BEENISH, EDEEC, TDEEC, DDEEC et DEEC sont adaptés à des réseaux hétérogènes à deux niveaux, mais peuvent également être utilisés pour des réseaux hétérogènes à plusieurs niveaux.

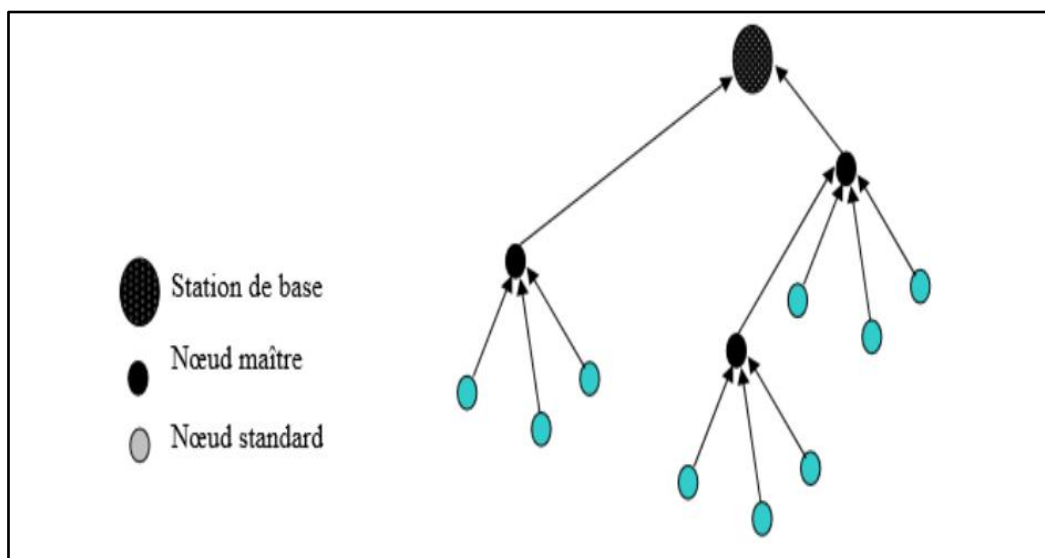


Figure 3.2 :Routage hiérarchique.

3.3.4 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy):

LEACH est un protocole de routage destiné aux réseaux de capteurs. Son principal avantage est de minimiser la consommation énergétique des éléments du réseau. Le protocole LEACH est un protocole hiérarchique, car le réseau est divisé en clusters, et chaque cluster possède un nœud “maître”, le nœud maître est en charge de la gestion de son cluster. Il est élu périodiquement parmi les nœuds formant le cluster, en fonction de l'état de sa batterie. Un message qui est émis par un nœud au sein d'un cluster, est ensuite routé par le nœud maître vers la passerelle du réseau de capteurs. Si on considère que la distance entre le nœud maître et un nœud du cluster est faible, la puissance nécessaire à l'envoi d'un paquet entre eux est aussi faible qu'une communication directe entre un nœud et la passerelle.

Le protocole LEACH permet ainsi en structurant le réseau de manière hiérarchique de proposer un protocole qui économise l'énergie d'un capteur désirant émettre un paquet.

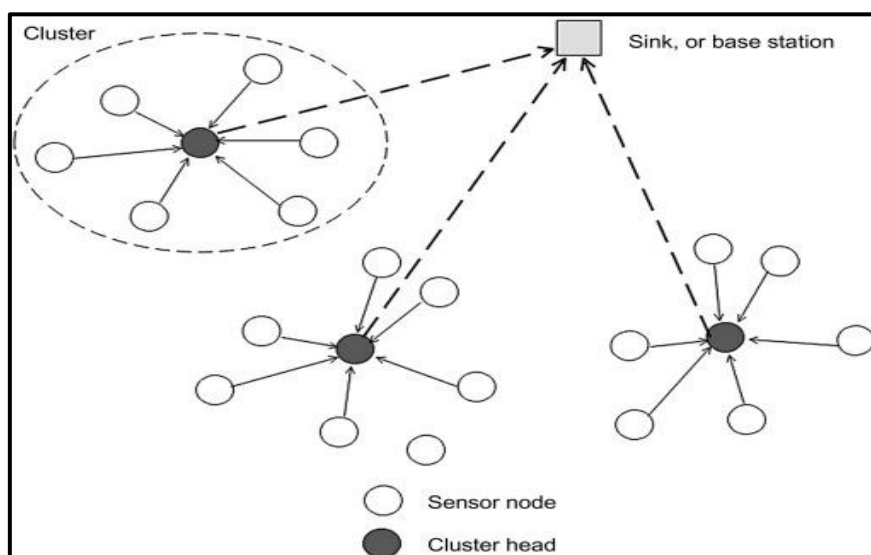


Figure 3.3 : Architecture du routage hiérarchique LEACH

Chaque round se compose de deux phases : initialisation où les groupes et le chef de groupe sont créés et la deuxième phase c'est la phase de transmission où les données sont transmises :

A. La phase d'initialisation :

Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs et en établissant la politique d'accès au média au sein de chaque groupe. Cette phase commence par la prise de décision locale pour devenir cluster-Head. Chaque nœud n choisit un nombre aléatoire, si ce nombre est inférieur à une valeur $T(n)$, le nœud devient cluster-Head. $T(n)$ est définie comme suit[33] :

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

Avec:

P: pourcentage désiré de cluster-heads pendant un round.

n : numéro de round.

r : round courant.

G : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élu cluster-heads pendant les $1/P$ rounds précédents.

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu cluster-head émet un message de notification. Les nœuds membres récoltent les messages de notification, et décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu : le cluster-head ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision. Toutes les communications précédentes étant faite dans une topologie plate, la méthode CSMA doit être employée. Par la suite, les communications au sein d'un cluster peuvent être faites avec la méthode TDMA. Pour cela, chaque chef établie un Schedule TDMA pour ses membres, en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Ce Schedule est envoyé aux membres.

Le schéma ci-dessous est une présentation graphique des étapes de la phase d'initialisation du protocole LEACH.

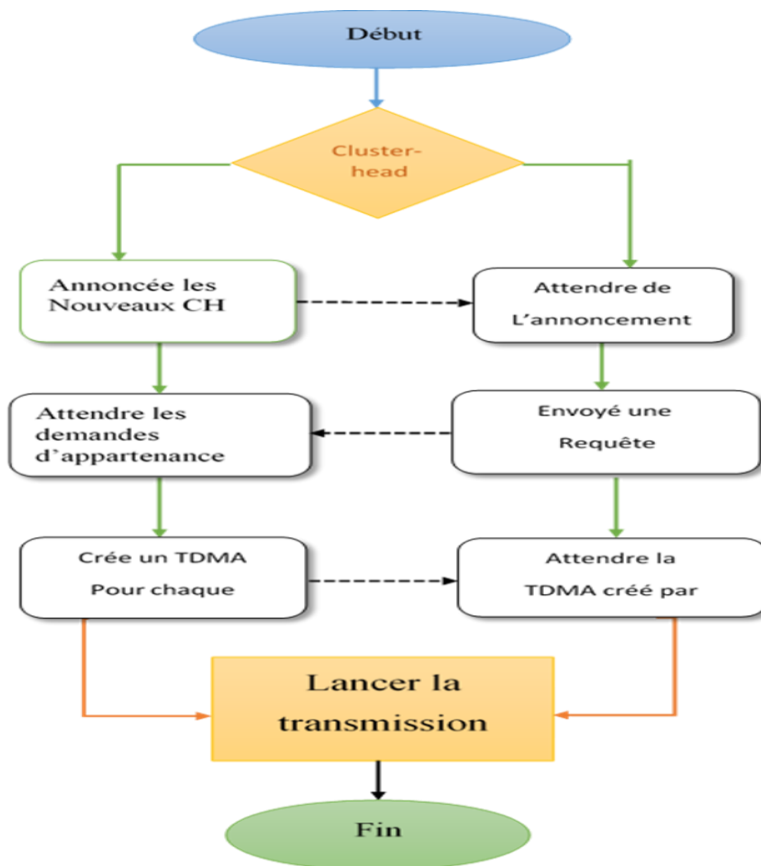


Figure 3.4 : algorithme de la phase d'initialisation.

B. a phase de transmission :

En utilisant le Schedule TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Ces informations sont ensuite agrégées, pour être transmises au collecteur (station de base). Cette communication, entre un cluster-head et le collecteur, se fait d'une manière directe, i.e. : le cluster-head adapte son émetteur radio afin d'atteindre directement le collecteur [34].

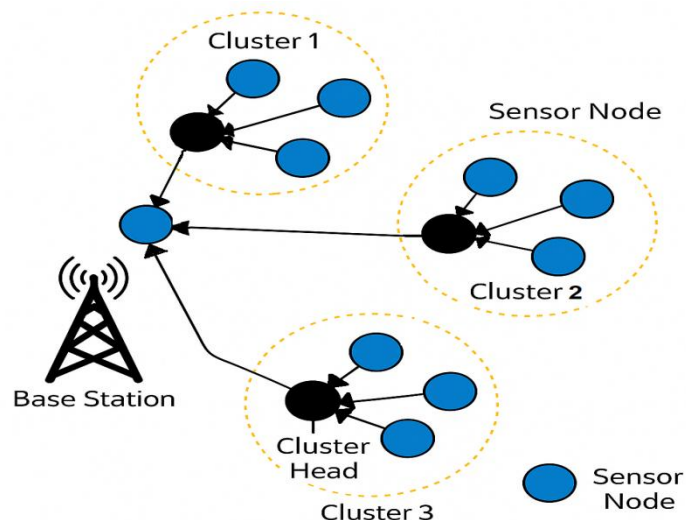


Figure 3.5 : Transmission des données à la station de base

3.3.5 DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) :

DEEC (Clustering Énergétiquement Efficace Distribué) est un protocole hétérogène à deux niveaux d'énergie contenant des nœuds normaux et des nœuds avancés. Il repose sur le principe que chaque nœud peut devenir chef de cluster (CH) avec une probabilité proportionnelle à son énergie résiduelle actuelle $E_i(r)$ par rapport à l'énergie moyenne du réseau, $E(r)$. Cette stratégie vise à équilibrer la charge énergétique et à éviter que les nœuds à faible énergie soient sur-sollicités.

Les performances du protocole DEEC résident principalement dans la fonction de probabilité et le critère de seuil $T(s_i)$ pour la sélection du CH. L'énergie résiduelle utilisée par DEEC pour le $i^{\text{ème}}$ nœud au tour r est égale à $E_i(r)$ du nœud par rapport à l'énergie moyenne $E(r)$ du WSN. [35] donnée par la formule suivante :

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(r)$$

La probabilité p_i qu'un nœud devienne CH est alors calculée par :

$$p_i = \frac{p_{opt} \cdot E_i(r)}{\bar{E}(r)}$$

$$= \begin{cases} \frac{P_{opt} E_i(r)}{(1 + am)E(r)} & \text{si } S_i \text{ noeud normal} \\ \frac{P_{opt} (1 + a)E_i(r)}{(1 + am)E(r)} & \text{si } S_i \text{ noeud avancé} \end{cases}$$

Où :

- p_{opt} : est la probabilité optimale de devenir CH (fixée à 0,1 dans notre simulation).
- $E_i(r)$: représente l'énergie résiduelle du nœud i .
- $\bar{E}(r)$: est l'énergie moyenne de tous les nœuds au round r .

Pour garantir que chaque nœud devienne CH une fois toutes les $1/p_i$ itérations, DEEC applique un seuil de sélection donné par :

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{p_i}{1 - p_i \cdot (r \bmod \frac{1}{p_i})} & \text{si } s_i \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

G est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CH au cours des $1/p_i$ derniers rounds.

En sommant les probabilités de tous les nœuds, on obtient :

$$\sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N \frac{p_{opt} \cdot E_i(r)}{\bar{E}(r)} = N \cdot p_{opt}$$

Ce résultat garantit qu'il y aura en moyenne $N \cdot p_{opt}$ chefs de cluster à chaque round, comme souhaité.

Ce mécanisme adaptatif permet d'augmenter la durée de vie du réseau, tout en assurant une bonne répartition des responsabilités entre les nœuds.

3.3.6 DDEEC (Developed Distributed Energy-Efficient Clustering):

Le protocole DDEEC (DEEC Amélioré Distribué) est un protocole homogène avec trois niveaux d'énergie (nœuds normaux, nœuds avancés et super-nœuds). DDEEC a été développé pour corriger une faiblesse de DEEC, à savoir que les nœuds avancés (ayant plus d'énergie initiale) deviennent trop souvent chefs de cluster (CH) et s'épuisent plus rapidement que les nœuds normaux.

Pour équilibrer cela, DDEEC introduit un seuil d'énergie résiduelle TH_{REV} qui distingue les phases où un nœud peut être sur-sollicité. Lorsque l'énergie résiduelle d'un nœud avancé devient inférieure à ce seuil, sa probabilité d'être élu CH est réduite au niveau des nœuds normaux.

Le seuil est défini par :

$$TH_{REV} = E_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot E_{disNN}}{E_{disNN} - E_{disAN}} \right)$$

Et peut être approximé par :

$$TH_{REV} \approx \frac{7}{10} E_0$$

Où :

E_0 : énergie initiale des nœuds normaux.

α : facteur de hétérogénéité.

E_{disNN} , E_{disAN} : énergies moyennes dissipées respectivement par les nœuds normaux et avancés.

DDEEC applique la même stratégie que DEEC pour estimer l'énergie moyenne du réseau. La probabilité p_i d'être élu CH est définie comme suit[36] :

$$p_i = \begin{cases} \frac{p_{opt} E_i(r)}{(1+am)\bar{E}(r)} & \text{pour un nœud normal, si } E_i(r) > TH_{REV} \\ \frac{p_{opt} E_i(r)(1+a)}{(1+am)\bar{E}(r)} & \text{pour un nœud avancé, si } E_i(r) > TH_{REV} \\ \frac{C p_{opt} E_i(r)(1+a)}{(1+am)\bar{E}(r)} & \text{pour un nœud avancé ou normal, si } E_i(r) \leq TH_{REV} \end{cases}$$

Où :

C : un facteur de correction () permettant de réduire la charge sur les nœuds épuisés.

m : la fraction des nœuds avancés dans le réseau.

$\bar{E}(r)$: l'énergie moyenne au round.

$E_i(r)$: l'énergie résiduelle du nœud à l'instant.

Ce mécanisme permet de prolonger la durée de vie du réseau en équilibrant mieux la consommation d'énergie entre les différents types de nœuds.

3.3.7 EDEEC (Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering):

Le protocole EDEEC (Clustering Énergétiquement Efficace Distribué Amélioré) est une extension de DDEEC, conçue pour gérer des réseaux de capteurs sans fil présentant une hétérogénéité à trois niveaux. Les nœuds du réseau sont répartis comme suit :

- Nœuds normaux (énergie E_0)
- Nœuds avancés (énergie $E_0(1 + \alpha)$)
- Super nœuds (énergie $E_0(1 + b)$)

La probabilité qu'un nœud s_i soit élu chef de cluster dépend de sa catégorie énergétique. Elle est calculée selon la formule suivante [37]:

$$p_i = \begin{cases} \frac{p_{opt} E_i(r)}{(1+m(a+m_0b))\bar{E}(r)} & \text{si } s_i \text{ est un nœud normal} \\ \frac{p_{opt}(1+a)E_i(r)}{(1+m(a+m_0b))\bar{E}(r)} & \text{si } s_i \text{ est un nœud avancé} \\ \frac{p_{opt}(1+b)E_i(r)}{(1+m(a+m_0b))\bar{E}(r)} & \text{si } s_i \text{ est un super nœud} \end{cases}$$

Où :

α : facteur d'énergie supplémentaire pour les nœuds avancés.

b : facteur d'énergie supplémentaire pour les super nœuds.

m : fraction de nœuds hétérogènes.

m_0 : proportion de super nœuds parmi les nœuds hétérogènes.

$\bar{E}(r)$: énergie moyenne du réseau à l'instant r .

$E_i(r)$: énergie résiduelle du nœud i au round r .

p_{opt} : probabilité optimale de sélection d'un CH (0,1 dans notre cas).

Ensuite, EDEEC applique un seuil de décision $T(s_i)$ pour décider si le nœud doit être élu chef de cluster. Ce seuil est donné par :

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{p_i}{1-p_i \left(r \bmod \frac{1}{p_i} \right)} & \text{si } p_i \in G' \\ \frac{p_i}{1-p_i \left(r \bmod \frac{1}{p_i} \right)} & \text{si } p_i \in G'' \\ \frac{p_i}{1-p_i \left(r \bmod \frac{1}{p_i} \right)} & \text{si } p_i \in G''' \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Ici :

G', G'', G''' représentent les ensembles de nœuds normaux, avancés et super nœuds n'ayant pas été CH au cours des derniers rounds.

Ce mécanisme assure une répartition équitable des rôles de CH entre les différents niveaux d'énergie, prolongeant la durée de vie du réseau tout en optimisant la consommation énergétique globale.

3.3.8 TDEEC (Threshold Distributed Energy Efficient Clustering) :

TDEEC améliore la stratégie de sélection des chefs de cluster en utilisant un seuil dynamique qui tient compte de l'énergie résiduelle du nœud, de l'énergie moyenne du réseau et du nombre optimal de CH k_{opt}

Le seuil de décision pour un nœud est donné par [38]:

$$T(s) = \frac{p}{1 - p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})} \cdot \frac{\text{Énergie résiduelle} \cdot k_{opt}}{\text{Énergie moyenne du réseau}}$$

Avec :

$$p = p_{opt}$$

$$k_{opt} = N \cdot p_{opt}$$

Cela permet de mieux contrôler la sélection des CH selon l'état réel des nœuds et prolonge significativement la durée de vie du réseau hétérogène.

3.3.9 BEENISH (Balanced Energy Efficient Network Integrated Super Heterogeneous) :

Basée sur le niveau d'énergie résiduelle des nœuds par rapport à l'énergie moyenne du réseau, la sélection des CHs dans BEENISH étend le même phénomène que celui décrit dans DEEC. BEENISH utilise la notion de quatre types de nœuds (4 niveaux d'énergie résiduelle) : nœuds normaux, avancés, super et ultra-super.

Selon l'énergie initiale P_i , la probabilité utilisée pour la sélection de CH et p_{opt} la référence pour p_i , BEENISH utilise différentes valeurs de P_{opt} pour les nœuds normaux, avancés, super et ultra-super[39]. La valeur de P_i dans BEENISH est donc :

$$p_i = \begin{cases} \frac{p_{opt} E_i(r)}{[a + m_0 ((b - a) + m_1 (c - b))] E(r)} & \text{si } S_i \text{ est un nœud normal} \\ \frac{p_{opt} (1 + \alpha) E_i(r)}{[a + m_0 ((b - a) + m_1 (c - b))] E(r)} & \text{si } S_i \text{ est un nœud avancé} \\ \frac{p_{opt} (1 + \alpha) E_i(r)}{[a + m_0 ((b - a) + m_1 (c - b))] E(r)} & \text{si } S_i \text{ est un super nœud} \\ \frac{p_{opt} (1 + \alpha) E_i(r)}{[a + m_0 ((b - a) + m_1 (c - b))] E(r)} & \text{si } S_i \text{ est un ultra-super nœud} \end{cases}$$

P_{opt} : probabilité optimale de devenir CH (souvent fixée à 0.1)

$E(r)$: énergie moyenne de tous les nœuds au round r

$E_i(r)$: énergie résiduelle du nœud i au round r

m_0 : fraction de super-nœuds dans les hétérogènes

m_1 : fraction d'ultra-super nœuds dans les hétérogènes

a, b, c: facteurs d'énergie supplémentaires

La sélection du CH en fonction du seuil pour les quatre types de nœuds est donnée comme suit[40] :

$$T(S_i) = \begin{cases} \frac{P_i}{1 - P_i * \left(r \bmod \frac{1}{P_i} \right)} & \text{si } P_i \in G^I \\ \frac{P_i}{1 - P_i * \left(r \bmod \frac{1}{P_i} \right)} & \text{si } P_i \in G^{II} \\ \frac{P_i}{1 - P_i * \left(r \bmod \frac{1}{P_i} \right)} & \text{si } P_i \in G^{III} \\ \frac{P_i}{1 - P_i * \left(r \bmod \frac{1}{P_i} \right)} & \text{si } P_i \in G^{IV} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

3.3.10 I-BEENISH (Improved Balanced Energy Efficient Network Integrated Super Heterogeneous) :

I-BEENISH met en œuvre le même concept que BEENISH et se compose de cinq types de nœuds : nœuds avancés normaux, super nœuds, ultra-super nœuds et nœuds extrêmes basés sur les énergies initiales des nœuds. Le calcul de la probabilité P_i pour qu'un nœud devienne CH est donnée par l'équation suivante[41] :

$$p_i = \begin{cases} \frac{p_{opt} \cdot E_i(r)}{D_r} & \text{if } S_i \text{ is the normal node} \\ \frac{p_{opt} \cdot (1 + a) \cdot E_i(r)}{D_r} & \text{if } S_i \text{ is the advanced node} \\ \frac{p_{opt} \cdot (1 + a) \cdot E_i(r)}{D_r} & \text{if } S_i \text{ is the super node} \\ \frac{p_{opt} \cdot (1 + a) \cdot E_i(r)}{D_r} & \text{if } S_i \text{ is the Ultra - super node} \\ \frac{p_{opt} \cdot (1 + a) \cdot E_i(r)}{D_r} & \text{if } S_i \text{ is the Extreme node} \end{cases}$$

D_r : normalisation de la probabilité selon les niveaux d'hétérogénéité

Où le dénominateur $D_r = m(a+m_0(ba)+m_1 \{ (cb)+m_2(d-c) \})$

3.4 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil hétérogènes jouent des rôles très importants dans l'acquisition, le prétraitement et le transfert des données depuis la source jusqu'à la destination. Les protocoles adaptés permettent d'assurer au réseau une plus longue longévité, cependant la mise en œuvre de tels mécanismes est parfois complexe. Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'implémentation de plusieurs de ces protocoles et nous en ferons des comparaisons des résultats issus de simulations.

Chapitre4

Implémentation

Environnement de programmation

4.1 Introduction :

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à présenter les outils de développement employés pour la mise en œuvre de la simulation des protocoles de routage hiérarchiques hétérogènes étudiés dans le chapitre précédent, à savoir DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC. Ces protocoles sont conçus pour optimiser la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en adaptant la sélection des Cluster Heads en fonction des niveaux d'énergie résiduelle des nœuds.

Nous détaillerons d'abord l'environnement de simulation utilisé, ainsi que les étapes d'implémentation de chacun de ces protocoles. Ensuite, nous procéderons à l'analyse des résultats obtenus à travers différentes simulations.

Enfin, une comparaison approfondie sera effectuée entre les performances des quatre protocoles (DEEC, DDEEC, EDEEC, et TDEEC) en se basant sur quatre métriques essentielles :

- Le nombre de nœuds morts au fil des rounds.
- Le nombre de nœuds vivants durant la simulation.
- Le nombre de paquets envoyés à la station de base (BS).
- Le nombre de Cluster Heads générés par round.

Cette évaluation nous permettra de mettre en évidence les forces et limites de chaque protocole, et de déterminer lequel offre les meilleures performances en fonction des scénarios simulés.

4.2 Environnement de développement :

4.2.1 Matériel utilisé :

Le développement de notre simulation a été réalisé à l'aide d'un ordinateur portable doté des caractéristiques techniques suivantes :

- Processeur intel(R) core(TM) i3-4005U CPU @ 1.70GHz 1.70GHz.
- RAM 4.00 GO.
- Système d'exploitation Microsoft Windows 10 professionnel.
- La simulation est effectuée sous Matlab

4.2.2 L'environnement MATLAB:

4.2.2.1 Présentation de Matlab :

Dans le cadre de la phase d'implémentation, nous avons choisi d'utiliser Matlab, un logiciel dédié à la programmation et à la manipulation de données numériques, largement utilisé dans les domaines des sciences appliquées. Développé et commercialisé par MathWorks. Matlab est un langage de haut niveau conçu pour simplifier la modélisation et la résolution des problèmes mathématiques. Sa syntaxe, proche du langage scientifique naturel, facilite grandement la compréhension et l'écriture du code. Étant un langage interprété, il permet l'exécution directe des instructions, sans nécessiter de compilation préalable. Matlab prend également en charge les structures de contrôle classiques telles que les boucles, les conditions et les sauts, ce qui rend le développement d'algorithmes à la fois fluide et accessible.

Nous avons utilisé la version MATLAB 2014a, qui introduit de nombreuses améliorations en matière d'interface utilisateur et autres performances. L'une des fonctionnalités majeures est la personnalisation des raccourcis clavier, ce qui permet d'accélérer considérablement certaines opérations fréquentes comme le copier-coller ou la génération de rapports. Cette version bénéficie également de l'intégration des conseils M-Lint, un outil d'assistance à la programmation qui propose des suggestions pertinentes, signale les erreurs potentielles et facilite la complétion du code. Par ailleurs, la fonctionnalité de publication de code a été optimisée, permettant désormais de placer librement les figures à l'aide d'un mode de capture dédié, rendant la présentation des résultats plus claire et mieux structurée.

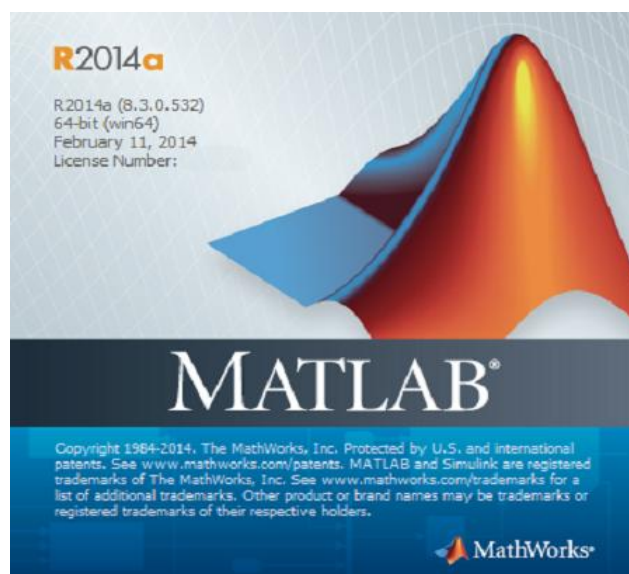


Figure 4.1 : Logo Matlab 2014a.

4.3 Les paramètres de simulation :

Paramètre	Valeur
Champ de réseau	(100,100)
nombre des nœuds	100
E_0 (énergie initiale des nœuds normaux)	0.5 J
Nombre maximal de tours	1000
Taille du message	4000 Bits
E_{elec}	50nJ/bit
E_{fs}	10nJ/bit/m ²
E_{amp}	0.0013pJ/bit/m ⁴
EDA	5nJ/bit/signal
d_0	70m
Popt	0.1

Tableau 4.1: Les paramètres de simulation.

4.4 Résultats de la Simulation :

4.4.1 Interface utilisateur :

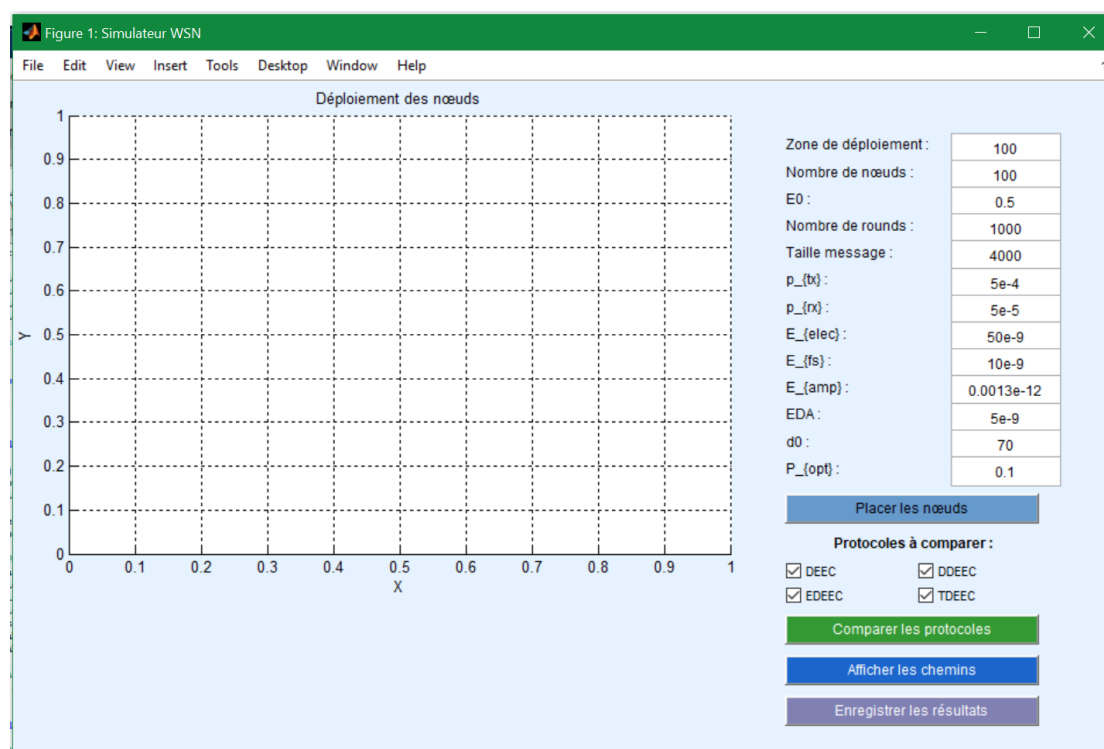


Figure 4.2 : Interface utilisateur du simulateur

Cette figure présente l'interface graphique développée pour la simulation. L'utilisateur peut définir les paramètres du réseau (nombre de nœuds, énergie, taille de message, etc.) et choisir les protocoles à comparer. L'interface permet aussi d'afficher les chemins de communication, de lancer la simulation et d'enregistrer les résultats.

4.4.2 Déploiement des nœuds :

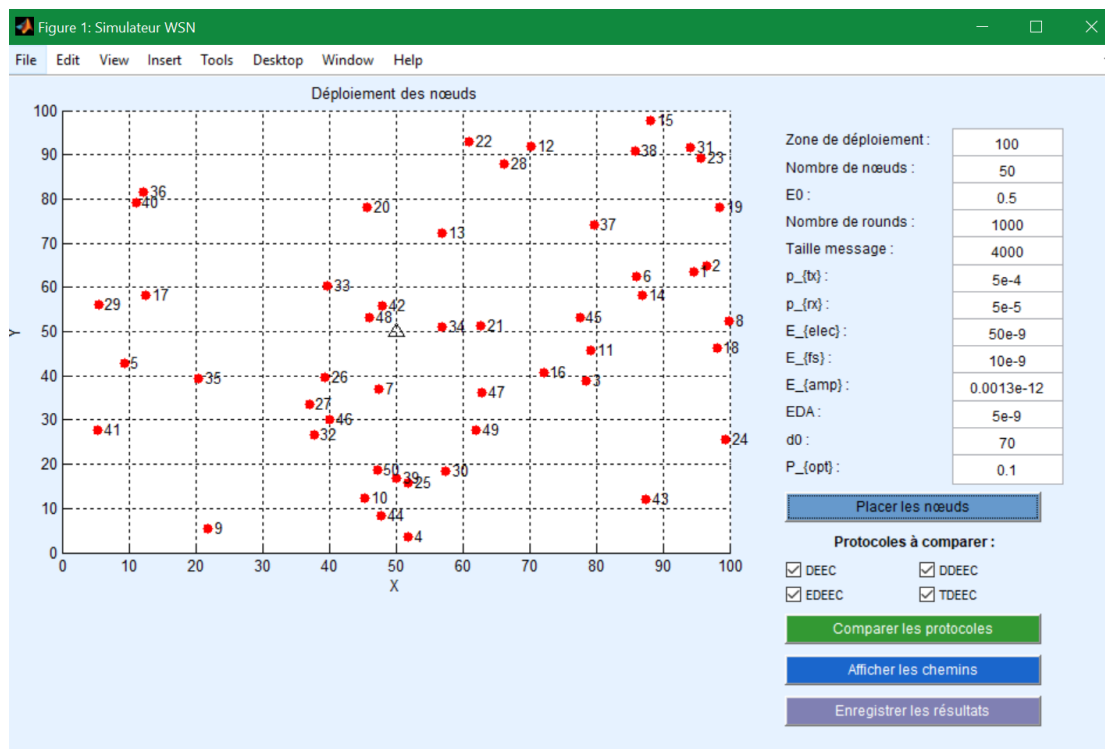


Figure 4.3 : Déploiement des nœuds

Cette figure illustre le déploiement aléatoire de 50 nœuds dans une zone carrée de 100x100 mètres. Chaque nœud est représenté par un point rouge numéroté, tandis que la station de base est symbolisée par un triangle situé au centre. À droite, l'interface permet de configurer les paramètres de simulation, notamment le nombre de nœuds, l'énergie initiale, la taille des messages, ainsi que les constantes énergétiques utilisées dans les modèles d'émission et de réception. Deux boutons fonctionnels essentiels complètent l'interface : le bouton "Afficher les chemins" permet de visualiser les routes empruntées par les données depuis les nœuds vers la station de base pour chaque protocole sélectionné, tandis que le bouton "Enregistrer les résultats" permet de sauvegarder les données de simulation pour une exploitation ultérieure. L'utilisateur peut également choisir les protocoles à comparer avant de lancer la simulation à l'aide du bouton "Comparer les protocoles".

4.4.3 Évolution des nœuds vivants :

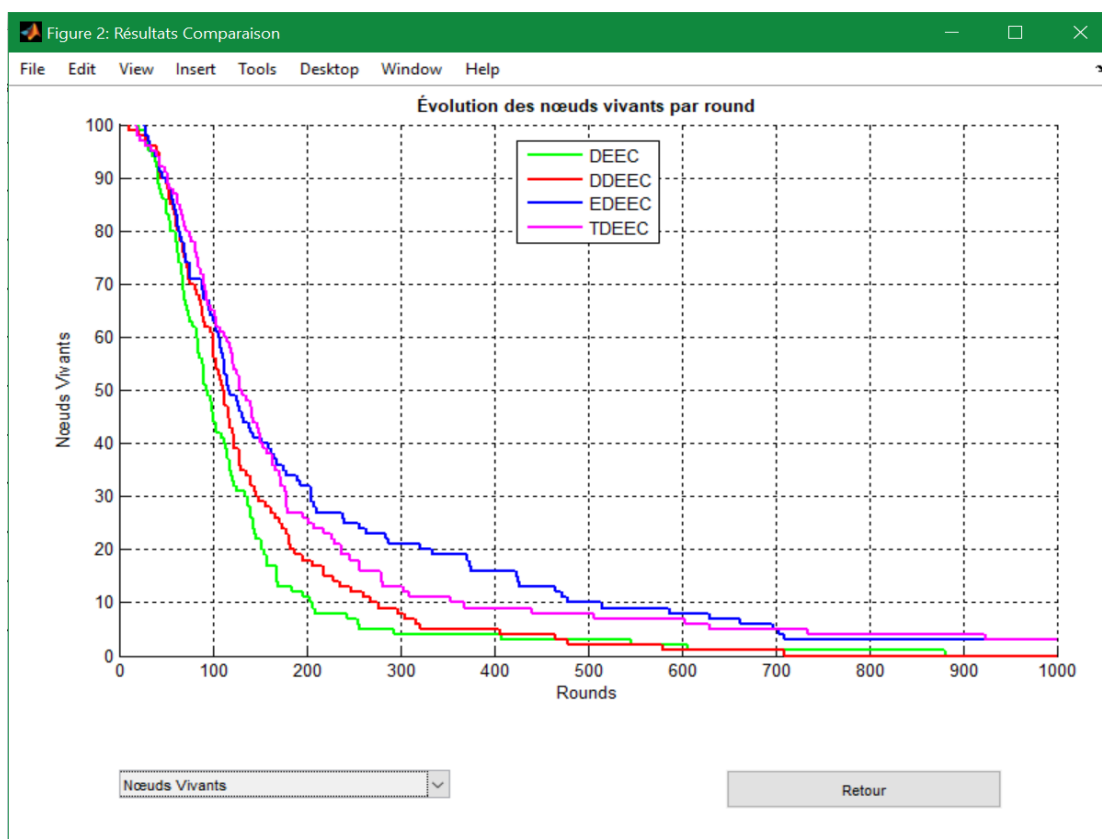


Figure 4.4 : Évolution des nœuds vivants par round

Cette courbe, complémentaire à la précédente, montre la diminution du nombre de nœuds vivants au cours du temps. Le protocole EDEEC conserve le plus longtemps des nœuds actifs dans le réseau, ce qui reflète une meilleure gestion de l'énergie. TDEEC montre aussi une bonne performance en termes de maintien de l'activité. En revanche, les courbes de DEEC et DDEEC chutent plus rapidement, indiquant une consommation énergétique plus agressive.

4.4.4 Nombre de Cluster Heads par round :

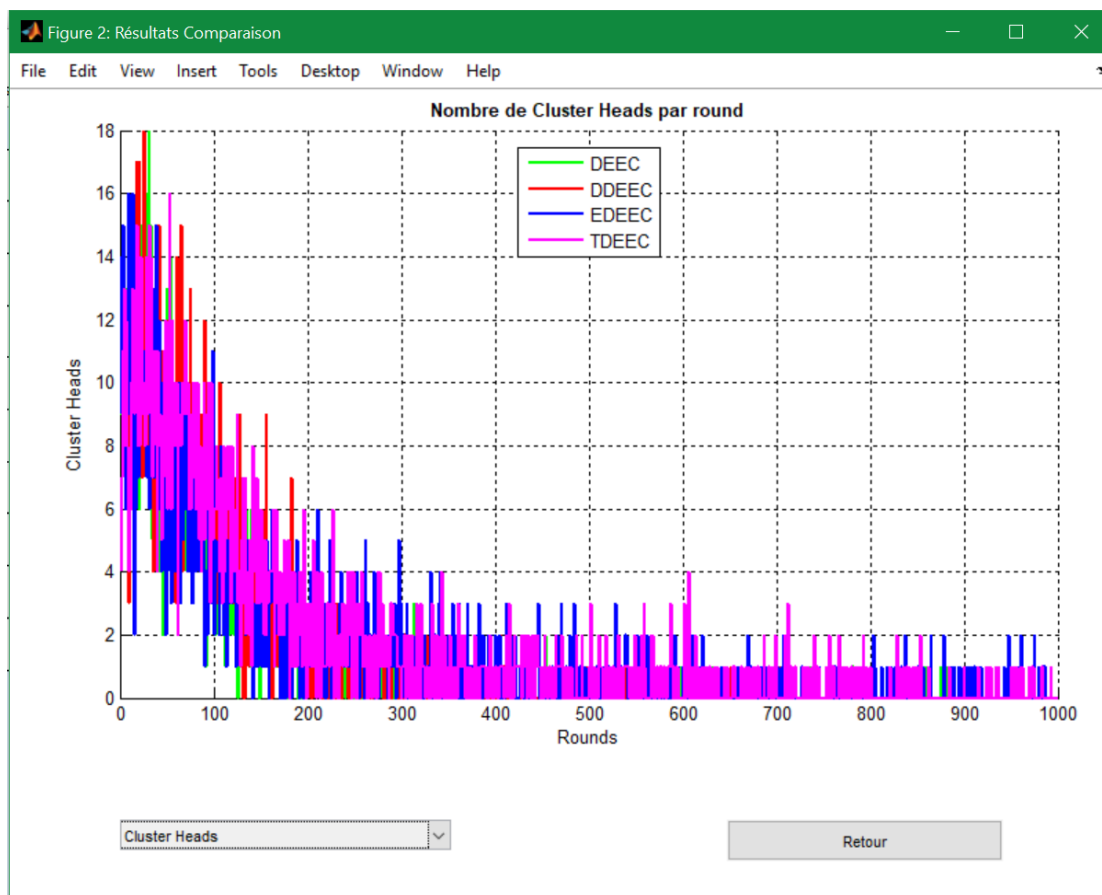


Figure 4.5 : Nombre de Cluster Heads par round

Ce graphique présente le nombre de Cluster Heads formés à chaque round. Les protocoles TDEEC et EDEEC maintiennent un nombre relativement stable de Cluster Heads tout au long de la simulation, ce qui favorise une meilleure organisation du réseau. DEEC, quant à lui, montre une forte irrégularité et chute rapide, ce qui nuit à l'efficacité du routage.

4.4.5 Évolution des nœuds morts :

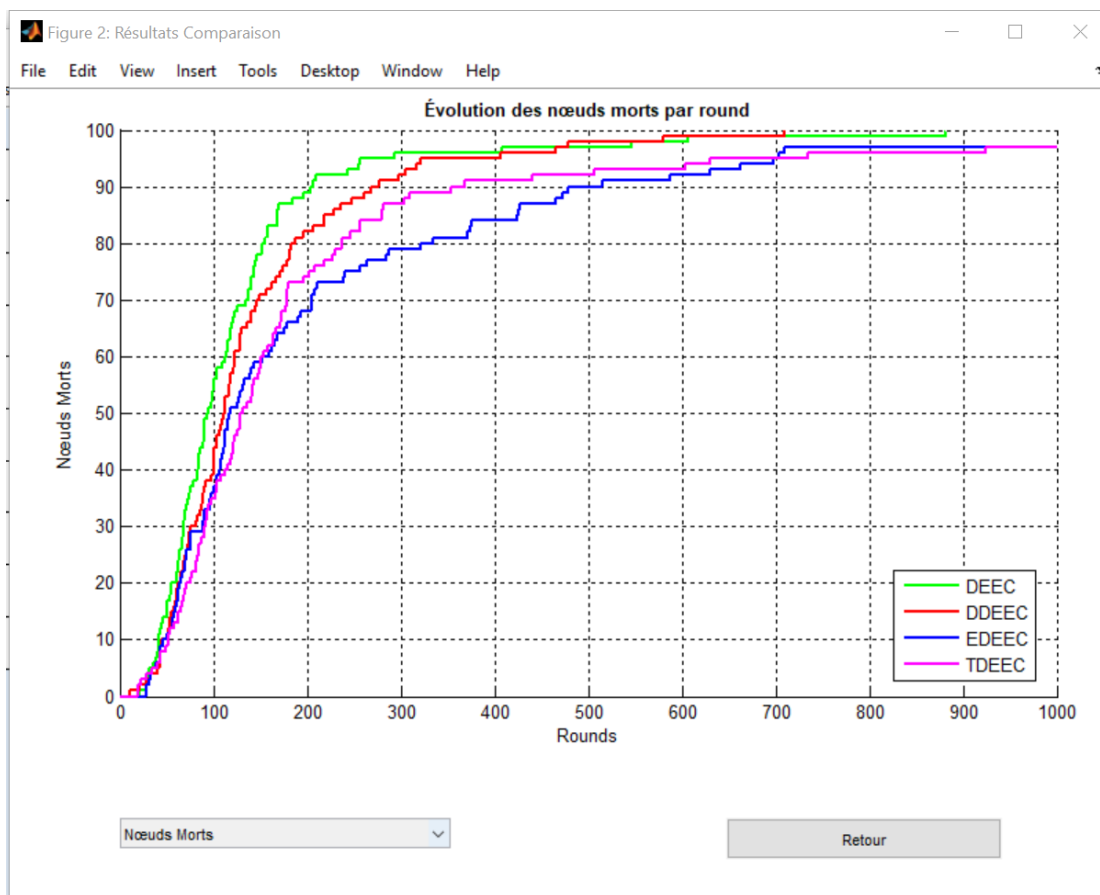


Figure 4.6 : Évolution des nœuds morts par round

Cette figure montre le nombre de nœuds morts au fil des rounds pour chaque protocole. On observe que le protocole EDEEC retarde significativement la mort des nœuds par rapport aux autres, atteignant 100 nœuds morts bien plus tard. TDEEC suit de près, ce qui confirme son efficacité énergétique. DDEEC se comporte de manière intermédiaire tandis que DEEC est le plus rapide à perdre tous ses nœuds. Ce résultat démontre que EDEEC prolonge la durée de vie du réseau.

4.4.6 Nombre de paquets envoyés à la station de base :

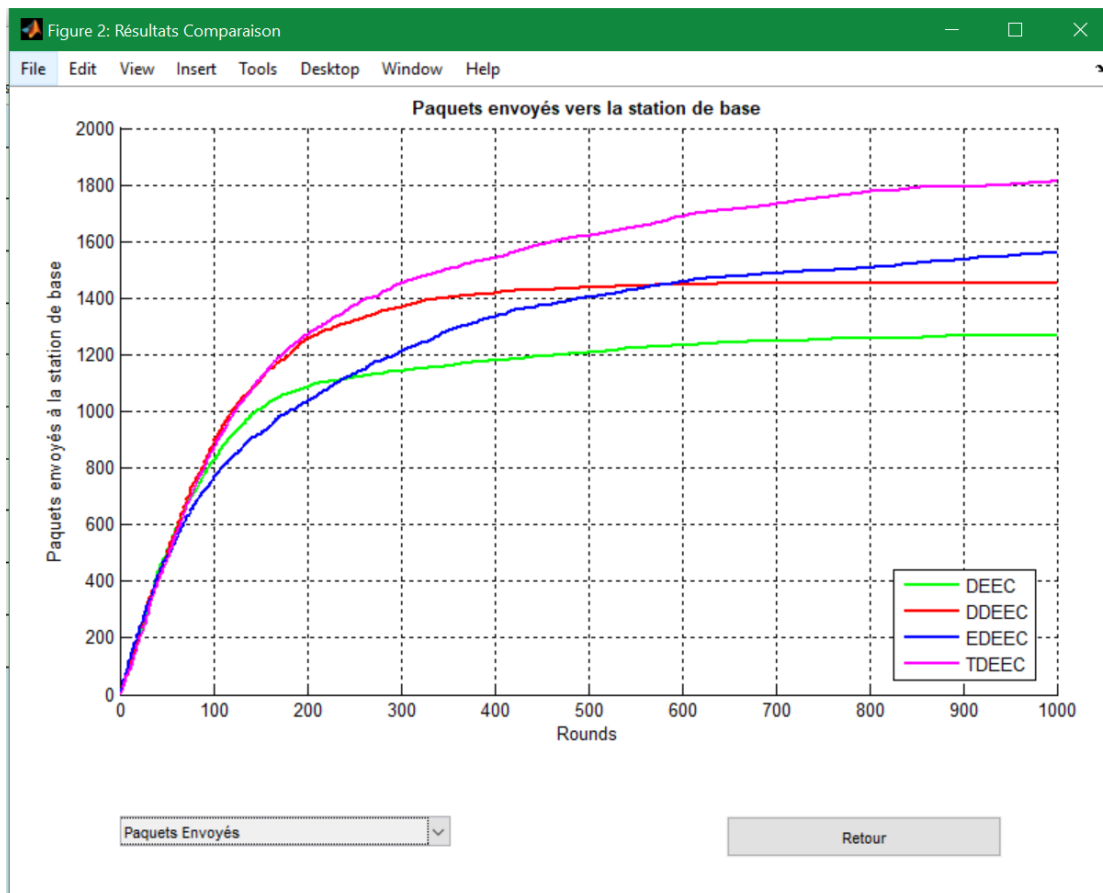


Figure 4.7 : Paquets envoyés vers la station de base

Cette figure illustre le nombre cumulé de paquets de données transmis à la station de base. TDEEC surpasse les autres protocoles en envoyant le plus grand volume de données, suivi par EDEEC. Cela signifie que TDEEC favorise une communication intensive tant que l'énergie le permet. DEEC reste loin derrière, ce qui confirme sa faible efficacité en termes de transmission utile.

4.5 Tableau comparatif des protocoles DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC:

Critère	DEEC	DDEEC	EDEEC	TDEEC
Durée de vie du réseau	Faible	Moyenne	Longue	Longue
Dernier nœud vivant	Très tôt	Moyen	Tardif	Tardif
Nombre total de paquets envoyés	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
Stabilité des Cluster Heads	Instable	Moyenne	Stable	Stable
Équilibre entre énergie et trafic	Déséquilibré	Moyen	Bon équilibre	Bon équilibre
Complexité du protocole	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Performances globales	Faible	Acceptables	Excellentes	Très bonnes

Tableau 4.2: Comparaison des performances des protocoles de routage hiérarchiques hétérogènes dans un réseau de capteurs sans fil

4.6 Conclusion synthétique :

- TDEEC : Meilleur en transmission de données avec bonne longévité.
- EDEEC : Meilleur en longévité, stabilité et équilibre énergétique.
- DDEEC : Compromis moyen.
- DEEC : Performances faibles dans ce scénario.

4.7 Conclusion :

Ce chapitre a fourni une description approfondie du processus de mise en œuvre et des résultats expérimentaux dérivés de la simulation des protocoles de routage hiérarchiques hétérogènes DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC dans un réseau sans fil reposant sur des capteurs. Une interface interactive a été conçue en utilisant l'environnement MATLAB, permettant de paramétrer le réseau, d'exécuter les protocoles choisis, d'afficher les voies de communication et de conserver les résultats. Le simulateur conçu a fourni une représentation précise du déploiement des nœuds, de leur activité et des indicateurs de performance clés.

L'étude comparative prenant en compte divers facteurs tels que le nombre de nœuds inactifs,

le nombre de nœuds actifs, les paquets transmis à la station principale et la stabilité des chefs de cluster a permis d'identifier les particularités propres à chaque protocole. On constate que EDEEC se démarque par son aptitude à allonger la longévité du réseau grâce à une gestion énergétique performante, tandis que TDEEC optimise la transmission des informations tout en préservant une stabilité notable. DDEEC fournit des performances moyennes, tandis que DEEC, malgré sa facilité d'implémentation, démontre les résultats les plus faibles dans notre situation de simulation.

Ces conclusions valident que la sélection du protocole de routage est conditionnée par les objectifs visés : prolongation de la longévité du réseau, stabilité de l'architecture ou volume d'informations acheminées. Quoi qu'il en soit, les méthodes perfectionnées telles que EDEEC et TDEEC offrent des avantages significatifs par rapport au protocole initial DEEC, ce qui justifie leur utilisation dans des applications où la performance énergétique et la durabilité sont cruciales.

Conclusion générale



Conclusion Générale

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) représentent une technologie clé pour de nombreuses applications modernes, allant de la surveillance environnementale à la domotique, en passant par les systèmes industriels, agricoles ou militaires. Leur structure distribuée, leur capacité d'auto-organisation et leur déploiement dans des environnements variés en font des outils puissants mais également complexes à gérer, notamment en raison de leurs fortes contraintes énergétiques et matérielles.

Tout au long de ce mémoire, nous avons exploré les fondements des RCSF, en abordant leur architecture, leurs caractéristiques techniques et leurs domaines d'application. Un accent particulier a été mis sur les protocoles de routage, qui jouent un rôle déterminant dans l'efficacité énergétique et la pérennité des réseaux. Nous avons présenté une classification des principaux types de protocoles, en détaillant les approches plates, hiérarchiques et géographiques, ainsi que les protocoles spécifiques aux réseaux hétérogènes.

Dans la partie expérimentale, l'implémentation et l'analyse comparative des protocoles DEEC, DDEEC, EDEEC et TDEEC ont permis de mettre en évidence les performances différenciées de ces approches en matière de consommation énergétique, de durée de vie réseau et d'efficacité de transmission. Les résultats obtenus montrent que les protocoles intégrant une gestion dynamique de l'énergie, comme TDEEC, offrent des gains significatifs en termes de longévité du réseau et de fiabilité de la communication

Références

- [1]: Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramanian, Y., & Cayirci, E. (2002). **Wireless Sensor Networks: A Survey**. *Computer Networks*, 38(4), 393–422.
- [2]: Karl, H., & Willig, A. (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- [3]: Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330.
- [4]: Perrig, A., Szewczyk, R., Wen, V., Culler, D. E., & Tygar, J. D. (2002). SPINS: Security Protocols for Sensor Networks. *Wireless Networks*, 8(5), 521–534.
- [5]: **Younis, O., & Fahmy, S.** (2004). HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, 3(4), 366–379
- [6]: Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin, D. (2000). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*, 56–67
- [7]: Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons.
- [8]: Pottie, G. J., & Kaiser, W. J. (2000). Wireless Integrated Network Sensors. *Communications of the ACM*, 43(5), 51–58.
- [9]: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=les+Composants+d%27un+N%C5%93ud+de+Capteur>.
- [10]: Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., & Heinzelman, W. (2002). A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2), 28–36.
- [11]: Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., ... & Culler, D. (2005). TinyOS: An Operating System for Sensor Networks. In **Ambient Intelligence** (pp. 115–148). Springer.

- [12] :Dunkels, A., Grönvall, B., & Voigt, T. (2004). Contiki - A Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Net worked Sensors. In **29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04)**, pp. 455–462.
- [13] :Baccelli, E., Hahm, O., Günes, M., Wählisch, M., & Schmidt, T. C. (2013). RIOT OS:Towards an OS for the Internet of Things. In**2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)**, pp. 79–80.
- [14] :C. Han, R. Kumar, R. Shea, E. Kohler, and M. Srivastava. (2005). A Dynamic Operating System for SensorNodes. In **Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)**, pp. 163–176.
- [15] :Abrach, H., Bhatti, S., Carlson, J., Dai, H., Rose, D., Sheth, A., & Han, R. (2003). MANTIS: System Support for Multimodal Networks of In-situ Sensors. In Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp. 50–59.
- [16] :Han, C.-C., Kumar, R., Shea, R., Kohler, E., & Srivastava, M. B. (2005). "**A dynamic operating system for sensornodes**", Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys).
- [17]: Mémoire fin de cycle, En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en informatique, thème :Amélioration et simulation du protocole de routage AORP dans les réseaux de capteurs sans fil ,Présenté par : GUETTAF Dihia ,HADJAL Lydia ,Promotion 2015-2016.
- [18] Mémoire fin de cycle, En vue de l'obtention du diplôme de Master en informatique, thème: Planification d'itinéraires de protocole LEACH sur l'algorithme GRASP dans les réseaux de capteurs sans fil, Présenté par : BEN CHAOUI Fouad ,Promotion 2017-2018.
- [19] : Mémoire fin de cycle,En vue de l'obtention du diplôme de Master en informatique, thème : Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil, Présenté par : SAHRAOUI belkheyr, Promotion 2012-2013
- [20] : Mémoire fin de cycle,En vue de l'obtention du diplôme de Master En : Télécommunications, thème : CLUSTERING ET ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS CORPORELS SANS FILS,Présenté par : BESSADDOUG ABDALLAH BOUDJEMAI ILYES, Promotion 2020-2021.

- [21] : Mémoire fin de cycle, En vue de l'obtention du diplôme de Master En : informatique, thème : Les protocoles hétérogènes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil: DEEC et EDEEC, Présenté par : MetarahYousra , Boudeb Amina, Promotion 2024.
- [22] : https://www.researchgate.net/publication/309061566_Building_efficient_multi-level_wireless_sensor_networks_with_cluster-based_routing_protocol
- [23]:Guemmadi, S. (2020). Adaptation de clustering phase de protocole de routage «LEACH» pour les réseaux de capteurs sans fil (Doctoral dissertation, Université laarbitebessitebessa).
- [24] : Mémoire fin de cycle, En vue de l'obtention du diplôme de Master En : informatique, thème : La Modélisation/Simulation des Protocoles de Routage dans les Réseaux de Capteurs sans Fil Réalisé par : - Bouanika Mehdi - Houssou Yasser Promotion 2024.
- [25] : Paul ingénieur.fr/base- MÜHLETHALER. <https://www.techniques documentaire/technologies-de-l-information-th9/reseau internet-protocoles multicast routagempls-et-mobilite-42289210/ routage-dans les-reseaux- ad hocte7520/routage géographique te7520niv10005 .html>. auteur , 10 nov. 2004
- [26] : Mémoire fin de cycle, En vue de l'obtention du diplôme de Master En : informatique, thème :Les mécanismes de communications efficaces et peu coûteux en énergie pour les Réseaux de Capteurs sans Fil Réalisé par : - AmrouniNadjet et Attouche souhilaPromotion 2018- 2019.
- [27] Khaled BOUCHAKOUR, « Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil: Protocole KhLCH (K-hopLayeredClusteringHierarchy) », mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de MAGISTER EN INFORMATIQUE, Ecole Doctorale, 2012.
- [28] **Akkaya, K., & Younis, M.** (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3(3), 325–349. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2003.09.010>
- [29] J. N. Al-Karaki & A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, 2004.
- [30] "Wireless ad hoc network," Wikipedia, consulted April 2025
- [31] W.Heinzelman, A.Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.
- [32] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, Dec. 2004.

- [33] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," in IEEE Aerospace Conference Proceedings, vol. 3, 2002, pp. 1125–1130.
- [34] M. Ye, C. Li, G. Chen, and J. Wu, "EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks," in IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005, pp. 535–540.
- [35] L. Qing, Q. Zhu, and M. Wang, "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 29, no. 12, pp. 2230–2237, Aug. 2006.
- [36] B. Elbhiri, R. Saadane, and D. Aboutajdine, "Developed Distributed Energy-Efficient Clustering (DDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of the 5th International Symposium on I/V Communications and Mobile Network, Rabat, Morocco, Sept. 2010.
- [37] M. B. Rasheed and N. Javaid, "Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering (EDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of 4th International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), 2010, pp. 524–530.
- [38] P. Saini and A. K. Sharma, "Energyefficient scheme for clustering protocol prolonging the lifetime of heterogeneous wireless sensor networks," *International Journal of Computer Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 30–36, Sep. 2010.
- [39] G. Smaragdakis, I. Matta, and A. Bestavros, "BEENISH: Balanced Energy Efficient Network Integrated Super Heterogeneous Protocol for Wireless Sensor Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 19, pp. 920–925, 2013.
- [40] M. Singh, S. Sharma, and N. Singh, "I-BEENISH: Improved balanced energy efficient network integrated super heterogeneous protocol for WSN," *Procedia Computer Science*, vol. 57, pp. 1227–1235, 2015.
- [41] N. Javaid, S. N. Mohammad, K. Latif, U. Qasim, Z. A. Khan, and M. A. Khan, "HEER: Hybrid Energy Efficient Reactive protocol for wireless sensor networks," in *Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, IEEE, 2013.