

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 20 Août -1955-Skikda

Faculté des sciences

Département d'informatique



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master
Académique
Option : Systèmes Informatiques

THEME

**Etude et évaluation des protocoles de
routage dans les réseaux de capteurs sans fil
hiérarchiques : LEACH, SEP et TSEP**

Réaliser par :

Saker Assia

Dounia Lekhchine

Encadré par :

Dr.REDJIMI Kenza

Session : Juin 2025

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières, leur soutien et leurs sacrifices innombrables. Merci pour tout.

À mon époux bien-aimé, pour sa patience, son encouragement constant et sa présence rassurante à chaque étape de ce parcours.

À mes enfants adorés, source de joie, de motivation et d'inspiration au quotidien.

À toute ma famille, pour leur affection, leur soutien moral et leurs mots d'encouragement.

À toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce travail. Votre aide m'a été précieuse.

À ma professeure encadrante, pour sa disponibilité, sa bienveillance, ses conseils avisés et son encadrement tout au long de ce projet.

À tous les enseignants qui ont enrichi mon parcours par leur savoir et leur dévouement.

Asia

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire de fin d'étude :

À ma chère maman,

Toi qui as quitté ce monde, mais jamais mon cœur.
Ton amour continue de me guider dans le silence
de ton absence. Puisse Allah t'accorder Sa paix
éternelle.

À mon père,

Pilier de ma vie, dont le soutien discret mais
constant m'a portée jusqu'ici.

À mon frère, mes sœurs, ainsi qu'à leurs enfants.

Et je n'oublie pas mes proches, chers à mon cœur.

Merci à vous d'avoir été là, simplement,
profondément, dans les moments de doute comme
dans les jours de joie.

Dounia

Remerciement

*Avant tout, nous remercions notre dieu qui nous a éclairé notre chemin et qui nous a donné la force pour réaliser ce travail. On tient à exprimer notre gratitude à notre encadrante Madame « **REDJIMI Kenza** » qui a accepté de suivre et d'évaluer ce travail. Nous tenons à lui assurer l'expression de notre profond respect et le remercier d'avoir participé à ce moment particulièrement important pour nous. Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont participé à notre formation et aux membres du jury qui ont accepté de valider ce travail.*

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) représentent une technologie clé pour les applications modernes, mais leur efficacité est limitée par des contraintes énergétiques strictes. Ce mémoire se concentre sur l'étude comparative des protocoles de routage hiérarchique LEACH, SEP et TSEP, qui optimisent la consommation d'énergie grâce à une organisation en clusters. Les protocoles sont évalués sur leur capacité à prolonger la durée de vie du réseau, à maintenir une couverture optimale et à réduire la latence, tout en équilibrant la charge entre les nœuds.

Les simulations réalisées sous MATLAB mettent en évidence les forces et les faiblesses de chaque protocole. LEACH montre des limitations évidentes en termes d'équilibrage énergétique, particulièrement pour les nœuds éloignés. SEP présente un meilleur compromis, avec une réduction notable de la mortalité précoce des nœuds. TSEP, quant à lui, se distingue par sa stabilité et son efficacité énergétique, tout en maintenant des niveaux de latence acceptables.

Cette étude comparative met en lumière l'évolution des protocoles de routage hiérarchique, depuis l'approche simple de LEACH jusqu'aux mécanismes avancés de TSEP. Les résultats soulignent l'importance d'adapter le protocole de routage aux caractéristiques spécifiques du réseau et aux exigences de l'application.

Mots-clés : Réseaux de capteurs sans fil, routage hiérarchique, LEACH, SEP, TSEP, économie d'énergie, durée de vie du réseau, simulation MATLAB.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) represent a key technology for modern applications, but their efficiency is limited by strict energy constraints. This thesis focuses on a comparative study of the hierarchical routing protocols LEACH, SEP, and TSEP, which optimize energy consumption through cluster organization. The protocols are evaluated based on their ability to extend network lifetime, maintain optimal coverage, reduce latency, and balance the load among nodes.

Simulations conducted in MATLAB highlight the strengths and weaknesses of each protocol. LEACH shows clear limitations in energy balancing, particularly for distant nodes. SEP offers a better compromise, significantly reducing early node mortality. TSEP, meanwhile, stands out for its stability and energy efficiency while maintaining acceptable latency levels.

This comparative study sheds light on the evolution of hierarchical routing protocols, from LEACH's simple approach to TSEP's advanced mechanisms. The results emphasize the importance of adapting the routing protocol to the specific characteristics of the network and application requirements.

Keywords: Wireless Sensor Networks, hierarchical routing, LEACH, SEP, TSEP, energy efficiency, network lifetime, MATLAB simulation.

ملخص

تعد شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) تقنية أساسية للتطبيقات الحديثة، ولكن كفاءتها محدودة بسبب القيود الصارمة على الطاقة. تركز هذه الأطروحة على دراسة مقارنة لبروتوكولات التوجيه الهرمية LEACH و TSEP و SEP، التي تعمل على تحسين استهلاك الطاقة من خلال تنظيم المجموعات. يتم تقييم البروتوكولات بناءً على قدرتها على إطالة عمر الشبكة، والحفاظ على التغطية المثلى، وتقليل زمن الاستجابة، وتحقيق التوازن في الحمل بين العقد.

تسلط المحاكاة التي أجريت في MATLAB الضوء على نقاط القوة والضعف في كل بروتوكول. يُظهر LEACH قيودًا واضحة في موازنة الطاقة، خاصة بالنسبة للعقد البعيدة. يقدم SEP حلاً وسطاً أفضل، حيث يقلل بشكل كبير من معدل موت العقد المبكر. في حين يتميز TSEP باستقراره وكفاءته في استخدام الطاقة مع الحفاظ على مستويات زمن انتقال مقبولة.

تسلط هذه الدراسة المقارنة الضوء على تطور بروتوكولات التوجيه الهرمي، من النهج البسيط لبروتوكول LEACH إلى الآليات المتقدمة لبروتوكول TSEP. تؤكد النتائج على أهمية تكيف بروتوكول التوجيه مع الخصائص المحددة للشبكة ومتطلبات التطبيق.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، التوجيه الهرمي، LEACH، SEP، TSEP، كفاءة الطاقة، عمر الشبكة، محاكاة MATLAB.

Table de matières

Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1. Introduction	4
2. Définition :	4
3. Les caractéristiques des RCSF :	5
3.1. Densité élevée des nœuds :	5
3.2. Topologie dynamique :	5
3.3. Auto-organisation :	5
3.4. Tolérance aux pannes :	5
3.5. Scalabilité :	5
4. Types de Capteurs dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil :	6
4.1. Réseaux de capteurs mobiles sans fil	6
4.2. Réseaux de capteurs sous-marins (RCSF_SM) :	6
5. Architecture des Capteurs dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil	7
5.1. Architecture matérielle :	7
5.1.1. L'unité d'acquisition:	8
5.1.2. L'unité de traitement:	8
5.1.3. L'unité de communication:	8
5.1.4. La batterie:	9
5.2. Logiciels :	9
6. Domaines d'applications des RCSF :	9
6.1. Applications militaires :	9
6.2. Applications en surveillance :	10
6.3. Applications environnementales :	10
6.4. Applications médicales :	11
6.5. Applications dans la domotique :	11
6.6. Applications commerciales et industrielles :	11
7. Durée de Vie des Réseaux de Capteurs Sans Fil :	11
7.1. Consommation d'Énergie :	12
7.2. Optimisation de la Durée de Vie :	12
7.3. Modèles Analytiques :	12
8. Déploiement des capteurs :	12
8.1. Déploiement déterministe :	12
8.2. Déploiement aléatoire :	12
9. Les avantages de Réseaux de Capteurs Sans Fil :	13

9.1.	Sécurité :	13
9.2.	Commodité :	13
9.3.	Economiques :	13
10.	Défis des réseaux de capteurs sans fil :	13
10.1.	Énergie :	14
10.2.	Communication :	14
10.3.	Routage :	14
10.4.	Sécurité :	14
10.5.	Configuration :	14
11.	Les différentes topologies dans les RCSF :	14
11.1.	La topologie en étoile :	14
11.2.	La topologie en toile ou grille (Mesh network) :	15
11.3.	La topologie hybride :	15
12.	Communication dans les RCSF :	16
12.1.	Pile Protocolaire :	16
12.1.1.	Couche physique :	16
12.1.2.	Couche liaison de données :	17
12.1.3.	Couche réseau :	17
12.1.4.	Couche transport :	18
12.1.5.	Couche application :	18
13.	Conclusion :	18
Chapitre 2 : Les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil		20
1.	Introduction	21
2.	Définition de routage	21
3.	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs	21
3.1.	Classification selon la structure du réseau :	22
3.1.1.	Routage hiérarchique :	22
3.1.2.	Routage basé sur la localisation (Géographique)	23
3.1.3.	Routage plat (flat based-routing)	25
3.2.	Classification selon la manière d'établissement de route	26
3.2.1.	Protocole proactif	26
3.2.2.	Protocole réactif	26
3.2.3.	Protocoles hybrides :	27
3.3.	Classification selon les modes opératoires :	27
3.3.1.	Routage multi-chemins	28
3.3.2.	Routage basé sur la négociation	28

3.3.3.	Protocoles de routage orientés qualité de service (QoS).....	28
4.	Les défis du routage dans les RCSF.....	28
4.1.	La consommation d'énergie :	28
4.2.	Extensibilité :	28
4.3.	Adressage :	29
4.4.	Robustesse :	29
4.5.	Topologie :	29
4.6.	Application :	29
5.	Comparaison entre Routage Hiérarchique & Routage Plat & Routage Géographique : .	30
6.	Conclusion.....	31
Chapitre 3 : Etude des protocoles de routage LEACH, SEP et TSEP		32
1.	Introduction	33
2.	Les protocoles de routage hiérarchiques	33
2.1.	Phase de configuration :	33
2.2.	Phase de transmission :	33
3.	Caractéristiques des protocoles hiérarchiques.....	34
3.1.	Le Clustering :.....	34
3.2.	L'architecture en cluster	34
3.2.1.	Noeud capteur (Sensor Node :	34
3.2.2.	Cluster :	35
3.2.3.	Cluster Head : CH :	35
3.2.4.	Station de base (Base Station : BS)	35
3.2.5.	Utilisateur final :.....	35
3.3.	La classification des clusters.....	35
3.3.1.	Selon les caractéristiques et la fonctionnalité des noeuds :	35
3.3.2.	Selon la forme de cluster :	36
3.4.	Processus d'établissement des clusters.....	36
3.4.1.	Phase d'élection de CH :	36
3.4.2.	Phase de formation de cluster :	36
3.4.3.	Phase de transmission :.....	36
3.5.	Communication inter-cluster	37
3.6.	Communication intra-cluster	37
4.	LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	38
4.1.	Fonctionnement de LEACH.....	39
4.1.1	Phase de configuration (setup phase).....	39
4.1.2	Phase de communication (steady phase).....	40

4.2.	Interférences entre clusters	41
4.3.	Avantages de LEACH	41
4.4.	Inconvénients de LEACH	42
5.	SEP (Stable Election Protocol)	42
5.1.	Fonctionnement de SEP	42
5.1.1.	Phase de Sélection des Chefs de Cluster (CH)	42
5.1.2.	Phase de Formation des Clusters.....	44
5.2.	Transmission des données en SEP	44
5.3.	Avantages de SEP.....	45
5.4.	Inconvénients de SEP	45
6.	TSEP (Threshold-sensitive Stable Election Protocol)	45
6.1.	Élection des Cluster Heads (CH) Sensible au Seuil.....	46
6.2.	Fonctionnement de TSEP	46
6.2.1.	Phase de configuration (setup phase).....	46
6.2.2.	Phase de Transmission des Données	48
6.3.	Avantages de TSEP.....	48
6.4.	Inconvénients de TSEP	48
7.	Conclusion.....	49
Chapitre 4 : Simulation et Évaluation des Protocoles LEACH, SEP et TSEP		51
1.	Introduction	52
2.	Environnement e simulation.....	52
2.1.	Environnement matériel	52
2.2.	L'outil de simulation pour les WSNs	53
2.2.1.	Présentation du Matlab.....	53
2.2.2.	Capacités Techniques de MATLAB	53
2.2.3.	Spécifiques à Notre Étude	54
2.3.	Métriques de performances.....	54
2.3.1.	Durée de Vie du Réseau (FND - First Node Death)	54
2.3.2.	Packet Delivery Ratio (PDR).....	55
2.3.3.	Énergie Résiduelle Moyenne	55
2.3.4.	Latence Moyenne	56
2.3.5.	Débit Réseau.....	56
2.3.6.	Couverture Réseau (Network Coverage).....	57
3.	Le Processus de Simulation.....	57
3.1.	Phase de Configuration	59
3.2.	Phase d'Exécution	62

3.3.	Phase d'analyse	64
4.	Simulation et Résultats.....	65
4.1.	Configuration Expérimentale	65
4.1.1.	Paramètres Généraux	65
4.1.2.	Paramètres Énergétiques	65
4.1.3.	Paramètres des Protocoles.....	66
4.1.4.	Configurations des Scénarios.....	66
4.2.	Résumé Numérique des Résultats.....	66
4.3.	Discussion des Résultats	67
4.3.1.	Scénario Réseau Standard (100 nœuds, 100m × 100m)	67
4.3.2.	Durée de vie du réseau (FND).....	69
4.3.3.	Taux de Livraison (PDR).....	69
4.3.4.	Débit Réseau.....	70
4.3.5.	Latence Moyenne	71
4.3.6.	Énergie Résiduelle.....	73
4.3.7.	Couverture Réseau.....	74
4.4.	Conclusion des Simulations.....	74
5.	Conclusion.....	75
	Conclusion Général	77
	Bibliographie.....	79

Table des figures

Figure 1 : Exemple de réseau de capteurs sans fil.	4
Figure 2: Les types de RCSF.	6
Figure 3 : Quelques exemples de capteurs	7
Figure 4 : Architecture d'un nœud capteur.	8
Figure 5: Applications militaires en RCSF	10
Figure 6 : Applications environnementales.....	10
Figure 7: Capteurs sans fil pour suivi médical sans contrainte.....	11
Figure 8: La topologie en étoile.	15
Figure 9: La topologie hybride.	16
Figure 10: La pile protocolaire des RCSF.	16
Figure 11: Le rôle de la couche liaison de données.	17
Figure 12: Les approches de routage dans les réseaux de capteurs.....	22
Figure 13 : Classification selon la structure du réseau.....	22
Figure 14 : Routage hiérarchique	23
Figure 15 : Routage basé sur la localisation (Géographique).....	24
Figure 16 : Routage plat (flat based-routing).	25
Figure 17 : Classification selon la manière d'établissement de route.	26
Figure 18 : Classification selon leurs modes opératoires.	27
Figure 19 : Organigramme du processus de simulation.....	34
Figure 20 : Principaux composants d'une architecture en cluster.	35
Figure 21 : Principaux composants d'une architecture en cluster.	37
Figure 22 : Architecture de communication LEACH.....	38
Figure 23 : Protocole LEACH avec deux tours différents.....	40
Figure 24 : Les différentes phases de LEACH.....	41
Figure 25 : Logo Matlab R2016.....	53
Figure 26 : Organigramme du processus de simulation.....	58
Figure 27 : Interface des paramètres de simulation.	68
Figure 28 : Résultat de simulation – Réseau standard.....	68
Figure 29 : Résultat de simulation – Durée de vie du réseau.....	69
Figure 30 : Résultat de simulation – PDR.	70
Figure 31 : Résultat de simulation – Début réseau.....	71
Figure 32 : Résultat de simulation – Latence Moyenne.....	72
Figure 33 : Résultat de simulation – Énergie Résiduelle.	73

Figure 34 : Résultat de simulation – Couverture réseau.....74

Liste des Table

Tableau 1: Avantages et inconvénients des protocoles proactif.....	26
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des protocoles réactif.....	27
Tableau 3 : Comparaison des approches de routage : Hiérarchique, Plat et Géographique.	31
Tableau 4 : Comparaison Synthétique des Protocoles LEACH, SEP ET TSEP.	49
Tableau 5 : Métriques de performance et leurs méthodes de calcul.	65
Tableau 6 : Paramètres généraux de simulation.	65
Tableau 7 : Modèle énergétique utilisé.	66
Tableau 8 : Paramètres spécifiques aux protocoles.	66
Tableau 9 : Configurations des trois scénarios réseau.....	66
Tableau 10 : Performance comparative des protocoles.	67

Liste des abréviations

WSN : Wireless Sensor Networks

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fil

MANET : Mobile Ad hoc Network

QoS : Quality of Service

RCSF_SM : Réseaux de Capteurs Sous-Marins

IP : Internet Protocol

TCP : Transmission Control Protocol

UDP : User Datagram Protocol

MAC : Media Access Control

FSO : Free Space Optics

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

SEP : Stable Election Protocol

TSEP : Threshold-sensitive Stable Election Protocol

GAF : Geographical Adaptive Fidelity

ZRP : Zone Routing Protocol

SAR : Sequential Assignment Routing

Sink : puits de données

CH : Cluster Head

SN : Sensor Node

BS : Base Station

PDA : Personal Digital Assistant

GPS : Global Positioning System

TinyOS : Système d'exploitation pour capteurs)

NesC : Langage de programmation pour TinyOS

TOSSIM : Simulateur pour TinyOS

ADCs : Analog-to-Digital Converters

IDE : Integrated Development Environment

CSV : Comma-Separated Values

PNG : Portable Network Graphics

FND : First Node Death

PDR : Packet Delivery Ratio

Introduction Générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une technologie clé pour la surveillance et la collecte de données dans des environnements variés, allant de l'agriculture intelligente à la gestion des catastrophes. Ces réseaux sont constitués de nombreux nœuds capteurs autonomes, souvent déployés dans des zones difficiles d'accès et alimentés par des batteries non remplaçables.

La principale contrainte de ces réseaux réside dans la gestion efficace de l'énergie, car le remplacement ou la recharge des batteries est généralement impossible une fois le réseau déployé. Face à cette problématique, la conception de protocoles de routage efficaces est devenue un enjeu majeur. Parmi les différentes approches, le routage hiérarchique s'est imposé comme une solution de référence pour réduire la consommation énergétique et prolonger la durée de vie du réseau. Dans ce schéma, les nœuds sont organisés en groupes appelés clusters, chacun étant dirigé par un chef de cluster (cluster-head). Ce dernier est responsable de la collecte, de l'agrégation et de la transmission des données vers la station de base, ce qui permet de limiter le nombre de communications longues distances et, ainsi, d'économiser l'énergie globale du réseau.

Plusieurs protocoles de routage hiérarchique ont été proposés, parmi lesquels LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), SEP (Stable Election Protocol) et TSEP (Threshold Sensitive Stable Election Protocol) occupent une place prépondérante. LEACH est le protocole pionnier qui introduit le concept de rotation aléatoire des chefs de cluster afin de répartir équitablement la charge énergétique entre les nœuds. SEP améliore cette approche en tenant compte de l'hétérogénéité énergétique des nœuds, optimisant ainsi la sélection des chefs de cluster pour prolonger la stabilité du réseau. TSEP, quant à lui, introduit la sensibilité aux seuils pour réduire encore davantage les transmissions inutiles, ce qui favorise une utilisation plus rationnelle de l'énergie particulièrement dans des environnements où les événements à détecter sont rares ou critiques

Ce mémoire a pour objectif de présenter, analyser et comparer trois protocoles de routage hiérarchique : LEACH, SEP et TSEP. Dans un premier temps, nous procéderons à une étude détaillée de leur fonctionnement théorique, en nous concentrant sur leurs mécanismes propres de sélection des chefs de cluster ainsi que sur leurs stratégies de

gestion énergétique, éléments essentiels pour optimiser la performance des réseaux de capteurs sans fil.

Par la suite, une évaluation comparative sera conduite par simulation, en s'appuyant sur des indicateurs clés tels que la durée de vie globale du réseau, la période de stabilité (c'est-à-dire le temps écoulé avant la défaillance du premier nœud), le taux de paquets correctement reçus à la station de base, ainsi que la consommation énergétique totale. Cette étude permettra de révéler les avantages et les limites de chaque protocole dans divers contextes, facilitant ainsi le choix du protocole le plus adapté aux besoins spécifiques des applications envisagées.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

1. Dans le premier chapitre, nous présentons les réseaux de capteur sans fil, une introduction, définitions, caractéristiques, architectures, applications, ainsi que les principaux défis liés à leur déploiement, notamment la gestion de l'énergie.
2. Dans le deuxième chapitre, nous soulignons les approches de routage dans les réseaux de capteurs, les défis du routage dans les RCSF, et la comparaison entre « routage hiérarchique, routage plat et routage géographique ».
3. Le troisième chapitre met en avant l'étude des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs (LEACH, SEP et TSEP), en présentant leurs définitions, leurs fonctions, ainsi que leurs avantages et inconvénients.
4. Le quatrième chapitre est consacré à la simulation des protocoles SEP, TSEP et LEACH, suivies d'une analyse comparative de leurs performances.

Enfin nous terminons notre mémoire avec une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) constituent une technologie essentielle pour la surveillance, la collecte et la transmission de données dans des environnements souvent hostiles ou difficiles d'accès. Composés de nœuds capteurs autonomes et limités en ressources, ces réseaux doivent relever de nombreux défis, notamment en matière de consommation énergétique, de couverture, de connectivité et de robustesse. Ce chapitre a pour objectif de présenter les fondements des réseaux de capteurs sans fil. Il aborde leurs principales caractéristiques, leurs architectures types, leurs domaines d'application, ainsi que les contraintes techniques et environnementales qui influencent leur conception. Une attention particulière est portée à la problématique énergétique, considérée comme un facteur déterminant dans la durabilité et l'efficacité des RCSF.

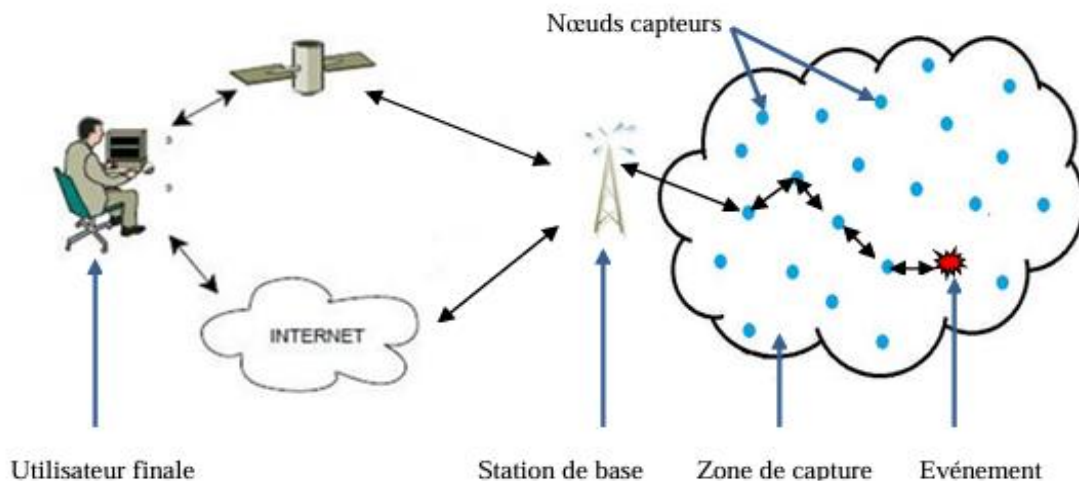


Figure 1 : Exemple de réseau de capteurs sans fil.

2. Définition :

Les réseaux de capteurs sans fil reposent sur l'interaction entre divers dispositifs de détection. Ces capteurs, de taille réduite et peu coûteux, possèdent des capacités limitées en matière de traitement, de mémoire, d'alimentation électrique et de bande passante. Certains d'entre eux restent fixes, tandis que d'autres, attachés à des objets en mouvement, se déplacent continuellement. La recherche dans ce domaine s'est principalement concentrée sur l'optimisation de la consommation énergétique lors du routage des données.

3. Les caractéristiques des RCSF :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont un type particulier de réseau Ad hoc, qui se distingue des réseaux mobiles ad hoc (MANET) traditionnels. Contrairement aux MANET, où l'objectif principal est d'optimiser la qualité de service (QoS) et d'assurer un bon débit de transmission malgré une forte mobilité, les RCSF ont des contraintes et des priorités différentes. Dans un MANET, l'alimentation énergétique n'est pas une contrainte majeure, car les batteries des dispositifs peuvent être remplacées facilement [1]

Source spécifiée non valide.

Les principales caractéristiques des RCSF sont les suivantes :

3.1. Densité élevée des nœuds :

Un réseau de capteurs est constitué d'un grand nombre de nœuds pour couvrir efficacement la zone surveillée et assurer une transmission fiable des données collectées [1].

3.2. Topologie dynamique :

La topologie d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) peut évoluer au fil du temps. Cette dynamique s'explique notamment par la mobilité de certains nœuds, qui peuvent être fixés à des objets en mouvement. Elle peut aussi résulter de l'ajout de nouveaux nœuds pour étendre la couverture du réseau ou du remplacement de nœuds défectueux ou hors service après le déploiement initial [1].

3.3. Auto-organisation :

Le réseau doit être capable de s'adapter aux changements de topologie en permettant aux nœuds de détecter leurs voisins et d'établir des routes de communication de manière autonome [1].

3.4. Tolérance aux pannes :

En cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs capteurs (panne d'énergie, dommage physique, interférences), le réseau doit continuer à fonctionner sans interruption. Le niveau de tolérance dépend de l'importance des données transmises et de l'application du réseau [1].

3.5. Scalabilité :

Un RCSF peut contenir plusieurs centaines, voire des milliers de capteurs. Une telle densité entraîne un grand nombre de transmissions internes, nécessitant un nœud central (puits de données) avec une mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [1].

4. Types de Capteurs dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil :

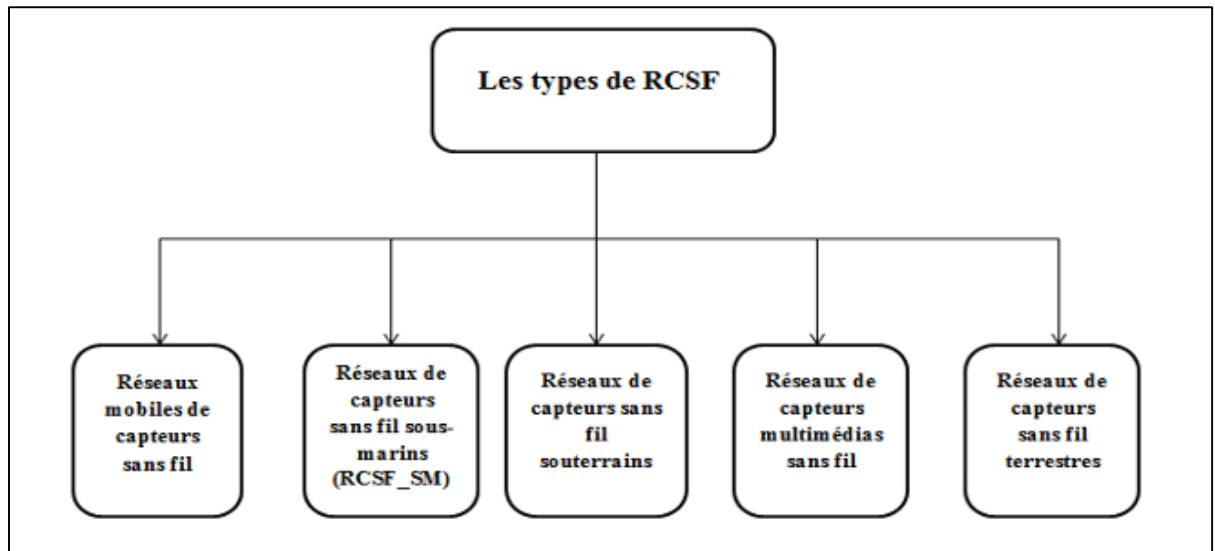


Figure 2: Les types de RCSF.

4.1. Réseaux de capteurs mobiles sans fil

Utilisent des nœuds mobiles, offrant une meilleure adaptabilité que les réseaux statiques. Ils s'adaptent facilement aux changements de topologie.

4.2. Réseaux de capteurs sous-marins (RCSF_SM) :

Conçus pour fonctionner dans l'eau, où les communications radio et acoustiques sont limitées. La communication optique (ondes vertes/bleues) est la plus adaptée pour les courtes distances. Ces réseaux sont utilisés pour la surveillance sous-marine, la sismologie, et les véhicules autonomes, mais rencontrent des défis en matière de sécurité, énergie et fiabilité.

4.3. Réseaux de capteurs souterrains

Destinés à surveiller des conditions sous la surface (humidité, composition du sol, etc.), avec transmission vers une station de base en surface.

4.4. Réseaux de capteurs multimédias

Permettent la transmission de données multimédias (audio, vidéo, image) pour des applications comme la surveillance ou la gestion du trafic. Ils nécessitent une large bande passante et des techniques avancées de compression.

4.5. Réseaux de capteurs terrestres

Constitués de nombreux nœuds répartis sur une zone géographique, utilisant l'énergie solaire et des technologies comme l'optique en espace libre (FSO) pour la communication. Les liaisons radio servent de secours en cas d'obstruction.



Figure 3 : Quelques exemples de capteurs

5. Architecture des Capteurs dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil

On peut considérer deux parties complémentaires concernant l'architecture des capteurs : l'architecture matérielle et l'architecture logicielle. L'architecture matérielle comprend tous les composants physiques qui composent le capteur dans son intégralité (unités de captage, processeur, mémoires, convertisseurs...), l'architecture software concerne l'ensemble des logiciels dédiés à l'exécution des tâches dévolues au capteur (système d'exploitation, programmes applicatifs...). Dans ce qui suit, nous donnerons un aperçu de ces deux composants. À cet effet nous développerons les deux architectures.

5.1. Architecture matérielle :

Un capteur se compose de quatre unités de base schématisées par la figure 1.4 suivante :

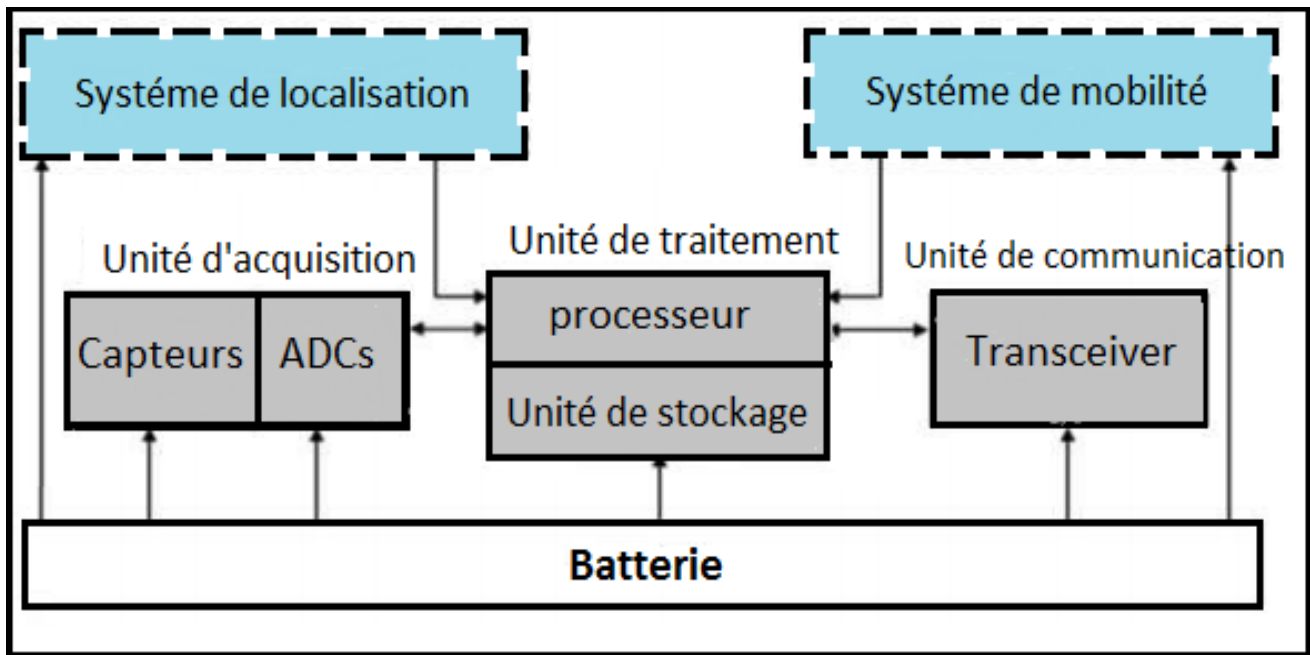


Figure 4 : Architecture d'un nœud capteur.

5.1.1. L'unité d'acquisition:

Appelée aussi unité de captage elle se compose généralement de deux sous unités à s'avoir les capteurs et les ADCs (Analog Digital Converter) qui sont des convertisseurs analogique-numérique. Les capteurs permettent une mesure sur des paramètres environnementaux pour fournir des signaux analogiques obtenus après conversion de ces données récoltées. Les ADCs vont convertir ces signaux analogiques en signaux numériques.

5.1.2. L'unité de traitement:

Se compose de deux interfaces une avec l'unité d'acquisition et l'autre avec l'unité de communication, son rôle est le contrôle du bon fonctionnement des autres unités un système d'exploitation nécessaire au fonctionnement du capteur peut y être embarqué sur certain modèle.

Cette unité permet l'exécution de procédures de communication qui permettent la collaboration d'un nœud avec les autres nœuds du réseau ; elle permet aussi l'analyse des données récoltées afin d'alléger le travail du nœud puits.

5.1.3. L'unité de communication:

Cette unité permet d'effectuer toutes les communications entre les différents nœuds sur un médium sans fil, car elle est dotée d'un émetteur/récepteur.

5.1.4. La batterie:

Elle alimente les unités que nous avons citées et elle n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System).

5.2. Logiciels :

Le logiciel sert à faire fonctionner les nœuds capteurs. Il s'agit d'ensembles de programmes informatiques dont les systèmes d'exploitation qui permettent de gérer le matériel en plus de divers autres programmes d'application. Plusieurs systèmes d'exploitation ont été développés pour répondre aux contraintes particulières des réseaux de capteurs, l'un des systèmes les plus connus est TinyOS. TinyOS : est un système d'exploitation open source conçu pour les capteurs sans fils et développé par l'Université de Berkeley. Il est basé sur une architecture à base de modules : pilotes pour les capteurs, les protocoles réseau et les services distribués. Les composants sont programmés en NesC, un langage de programmation dérivé du C adapté aux faibles ressources physiques des capteurs. Un certain nombre de plateformes sont directement programmables comme par exemple : les Tmote ou les MicaZ (ces deux modèles sont compatibles avec ZigBee). TOSSIM est un simulateur de capteurs pour les programmes TinyOS, tout programme en NesC peut être compilé de manière à être exécuté dans TOSSIM, ce qui permet de simuler le comportement d'un ou plusieurs capteurs ainsi de les programmer.

6. Domaines d'applications des RCSF :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont largement utilisés dans divers domaines, offrant des solutions efficaces en termes de coût, de facilité de déploiement et d'adaptabilité aux environnements variés.

6.1. Applications militaires :

Ces réseaux jouent un rôle crucial dans les opérations militaires en permettant la surveillance des champs de bataille, la collecte d'informations sur les mouvements des soldats et des véhicules, ainsi que la détection des menaces chimiques, biologiques et nucléaires [1].



Figure 5: Applications militaires en RCSF [22]

6.2. Applications en surveillance :

Les RCSF améliorent les systèmes de sécurité en surveillant l'état des bâtiments et des ponts pour détecter les fissures et les détériorations, et en mettant en place des alarmes intelligentes contre les intrusions non autorisées [1].

6.3. Applications environnementales :

Ces réseaux permettent de surveiller les forêts pour détecter les départs de feu, d'analyser la qualité de l'air en milieu urbain, et de prévenir les risques industriels en détectant les fuites de substances toxiques. En agriculture, ils optimisent l'irrigation en surveillant l'humidité du sol [1].

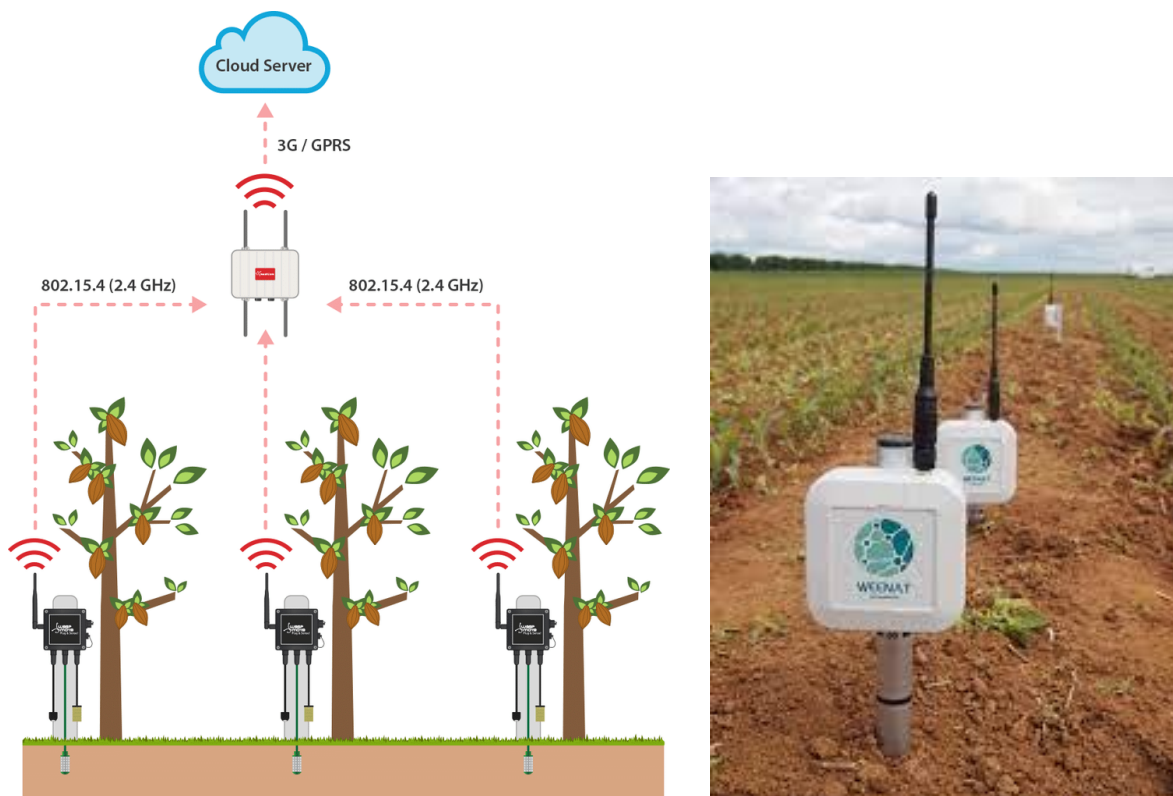


Figure 6 : Applications environnementales

6.4. Applications médicales :

Les RCSF facilitent le suivi des paramètres vitaux des patients, tels que la glycémie, la tension artérielle et le rythme cardiaque. Ils permettent un diagnostic médical plus précis et aident à surveiller les comportements anormaux chez les personnes âgées ou handicapées [1].

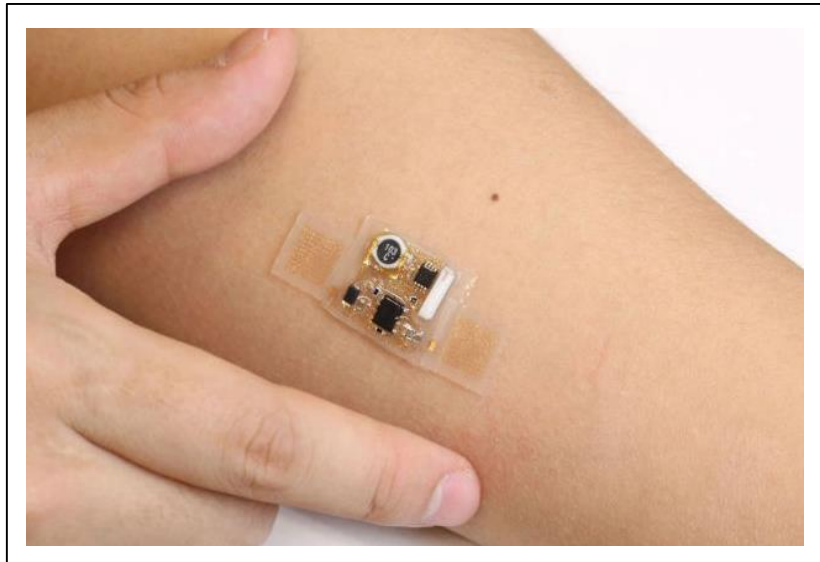


Figure 7: Capteurs sans fil pour suivi médical sans contrainte [23]

6.5. Applications dans la domotique :

Ces réseaux permettent d'automatiser les tâches domestiques, comme la gestion des appareils électroménagers à distance, le contrôle intelligent du chauffage et de la climatisation, ainsi que la sécurisation des maisons grâce aux capteurs de mouvement et aux systèmes d'alarme [1].

6.6. Applications commerciales et industrielles :

Les RCSF sont utilisés pour améliorer la gestion des stocks, assurer le contrôle qualité des produits, optimiser l'expérience des clients dans les magasins intelligents et surveiller les véhicules pour prévenir les vols et optimiser la logistique [1].

7. Durée de Vie des Réseaux de Capteurs Sans Fil :

La durée de vie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est un aspect crucial à considérer, car ces réseaux sont souvent déployés dans des environnements où le remplacement des batteries des capteurs est difficile, voire impossible. Voici quelques éléments clés concernant la durée de vie des RCSF :

7.1. Consommation d'Énergie :

La consommation d'énergie est l'un des principaux facteurs influençant la durée de vie des RCSF. Les capteurs doivent gérer leur énergie de manière efficace pour prolonger leur durée de vie. Les protocoles de routage jouent un rôle essentiel dans cette gestion en optimisant les chemins de communication pour réduire la consommation d'énergie [2].

7.2. Optimisation de la Durée de Vie :

L'optimisation de la durée de vie des RCSF implique des stratégies telles que la gestion de la couverture et de la connectivité du réseau. Il est essentiel de garantir une couverture complète de la zone de surveillance tout en maintenant une bonne connectivité entre les capteurs [3].

7.3. Modèles Analytiques :

Des modèles analytiques sont utilisés pour évaluer les performances des RCSF et comprendre les limitations fondamentales des différents systèmes. Ces modèles permettent d'examiner les performances des réseaux et d'optimiser leurs paramètres pour prolonger leur durée de vie [2].

8. Déploiement des capteurs :

8.1. Déploiement déterministe :

Lorsque l'environnement est accessible ou bien connu, les capteurs peuvent être positionnés précisément sur la zone à surveiller. Dans le cadre de notre étude, il est ainsi possible de programmer leur fonctionnement à l'avance. Par exemple, ce type de déploiement est utilisé pour les capteurs régulant la climatisation d'un bâtiment ou surveillant à distance les constantes médicales des patients. On parle alors de déploiement déterministe [4].

8.2. Déploiement aléatoire :

Dans certaines situations, notamment lorsque la zone est difficile d'accès ou dangereuse, un positionnement précis des capteurs est impossible. Il devient alors nécessaire de recourir à un déploiement aléatoire, où les capteurs sont dispersés de manière non contrôlée. Une méthode couramment évoquée est la dissémination des capteurs à la manière d'un semis de graines. Toutefois, la fragilité de ces dispositifs rend certaines solutions, comme le largage par avion, peu envisageables. Une alternative consiste à distribuer les capteurs à des individus pour qu'ils les disséminent. Dans ce

travail, nous considérerons un réseau de capteurs déployés de manière aléatoire. Une fois installés, ces capteurs sont supposés rester immobiles [4].

9. Les avantages de Réseaux de Capteurs Sans Fil :

9.1. Sécurité :

L'utilisation d'équipements sans fil est particulièrement avantageuse dans des environnements hostiles, où les conditions extrêmes (température élevée, acidité, pression intense, etc.) rendent l'accès difficile. Grâce à ces capteurs, les opérateurs peuvent suivre en temps réel l'évolution des paramètres sans s'exposer à des risques. De plus, ces dispositifs facilitent la collecte de données dans des zones reculées ou en mouvement, garantissant ainsi une surveillance efficace et sécurisée [5].

9.2. Commodité :

Les capteurs sans fil permettent la création de réseaux interconnectés, offrant aux ingénieurs un contrôle simultané de plusieurs points à partir d'un poste central. Cette technologie simplifie la supervision des processus industriels et optimise la gestion des installations. Par ailleurs, certains capteurs intègrent des fonctionnalités web, offrant un accès aux données en temps réel depuis n'importe quel emplacement, ce qui améliore la réactivité et la prise de décision [5].

9.3. Economiques :

L'adoption de solutions sans fil dans les systèmes de surveillance industrielle permet de réduire considérablement les dépenses liées à l'installation et à la maintenance des infrastructures câblées. En éliminant le besoin de câblage, de conduits et d'équipements complémentaires coûteux, ces technologies offrent une alternative économique tout en améliorant la flexibilité et l'efficacité des opérations [5].

10. Défis des réseaux de capteurs sans fil :

Malgré leur potentiel élevé, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ne sont pas encore pleinement optimisés. Leur évolution est freinée par un ensemble de contraintes techniques, amplifiées par la diversité croissante des applications. Ces défis ont suscité un fort intérêt de la communauté scientifique au cours des dernières années. Voici les principaux obstacles identifiés :

10.1. Énergie :

Les capteurs fonctionnent avec une batterie limitée. Il est crucial d'optimiser la consommation énergétique (détection, communication, traitement) pour prolonger la durée de vie du réseau.

10.2. Communication :

Fonctionnant dans des bandes ISM partagées, les RCSF doivent cohabiter avec d'autres technologies sans fil. Les protocoles comme IEEE 802.15.4 sont préférés, car adaptés aux réseaux à faible débit.

10.3. Routage :

Le routage est complexe du fait de l'absence de structure IP et de la topologie dynamique. Des protocoles légers, adaptés aux ressources limitées, sont nécessaires.

10.4. Sécurité :

Les RCSF sont vulnérables aux attaques. Il faut garantir l'authentification, la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité des données via des mécanismes de sécurité efficaces mais peu gourmands.

10.5. Configuration :

La gestion manuelle devient difficile avec l'échelle. Des mécanismes autonomes comme l'auto-configuration et l'auto-réparation sont essentiels pour l'adaptabilité du réseau.

11. Les différentes topologies dans les RCSF :

11.1. La topologie en étoile :

Dans ce type de réseau, une station de base joue un rôle central en assurant la communication avec plusieurs nœuds. Ces derniers ne peuvent échanger des informations qu'avec cette station, soit en lui envoyant des messages, soit en en recevant.

L'un des principaux avantages de cette structure est sa simplicité, ce qui facilite sa mise en place et sa gestion. De plus, elle permet de réduire la consommation d'énergie des nœuds, car ils communiquent directement avec la station de base, sans avoir besoin de relais intermédiaires. Elle diminue également la latence, car les messages n'ont qu'un seul saut à effectuer.

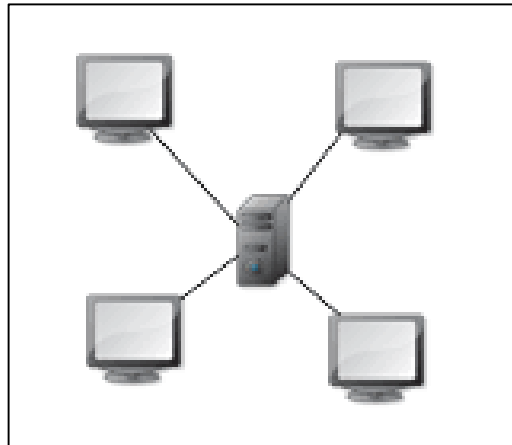


Figure 8: La topologie en étoile.

Cependant, son principal inconvénient est sa fragilité : si la station de base tombe en panne, tout le réseau cesse de fonctionner, car elle constitue le seul point central de communication et de gestion [6].

11.2. La topologie en toile ou grille (Mesh network) :

Dans ce modèle de réseau, chaque nœud a la capacité de communiquer avec tous les autres nœuds situés dans son rayon de transmission. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un message à une destination hors de sa portée directe, il s'appuie sur d'autres nœuds intermédiaires qui assurent la transmission progressive du message jusqu'à son destinataire. Ce procédé est connu sous le nom de communication multi-sauts [6].

11.3. La topologie hybride :

Une topologie hybride combinant les structures en étoile et en grille permet d'obtenir un réseau de communication à la fois robuste et flexible, tout en optimisant la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

Dans cette configuration, les capteurs à faible consommation d'énergie ne sont pas impliqués dans le routage des messages. À la place, des nœuds spécifiques, dotés d'une puissance plus élevée, prennent en charge cette fonction et assurent la transmission des données à travers le réseau.

Cette approche permet ainsi de préserver l'autonomie des capteurs tout en garantissant une communication efficace et fiable entre les différentes parties du réseau [6].

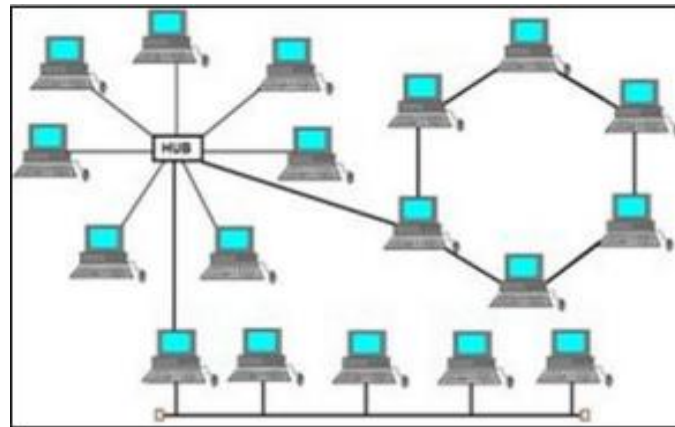


Figure 9: La topologie hybride.

12.Communication dans les RCSF :

12.1. Pile Protocolaire :

La pile protocolaire utilisée dans la station de base et les capteurs du réseau est composée de cinq couches : application, transport, réseau, liaison de données et physique. Elle intègre également trois plans transversaux (gestion des tâches, gestion de la mobilité et gestion de l'énergie) accessibles par toutes les couches. Cette architecture permet d'assurer une communication efficace, une optimisation des ressources et une meilleure gestion de l'énergie dans le réseau [6].

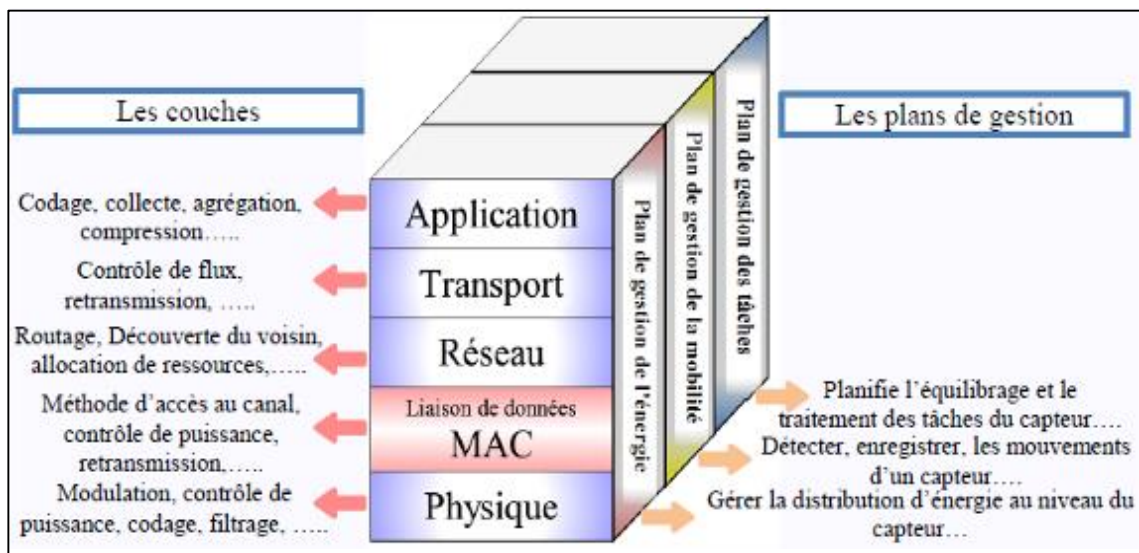


Figure 10: La pile protocolaire des RCSF.

12.1.1. Couche physique :

Cette couche joue un rôle clé dans la gestion du signal et la transmission des données. Elle s'occupe de la sélection et de la génération de la fréquence porteuse, ainsi que de la détection des signaux reçus. De plus, elle assure la modulation et la

démodulation des données pour leur transmission, ainsi que leur cryptage et décryptage pour garantir la sécurité des communications. La consommation d'énergie à ce niveau dépend fortement du schéma de modulation/démodulation utilisé et de la bande de fréquence choisie, ce qui influence directement l'efficacité du réseau.

12.1.2. Couche liaison de données :

Le protocole MAC (Media Access Control) de cette couche gère l'accès au support de communication, garantissant ainsi une transmission efficace des données entre les nœuds du réseau. Il définit les règles de transmission pour éviter les conflits et optimiser l'utilisation du canal. Cette couche prend en charge plusieurs fonctions essentielles, telles que le multiplexage des flux de données, la détection et la validation des trames, ainsi que le contrôle des erreurs. Elle permet d'établir des connexions fiables en mode point-à-point ou point-multipoint, assurant ainsi une communication stable et organisée au sein du réseau.

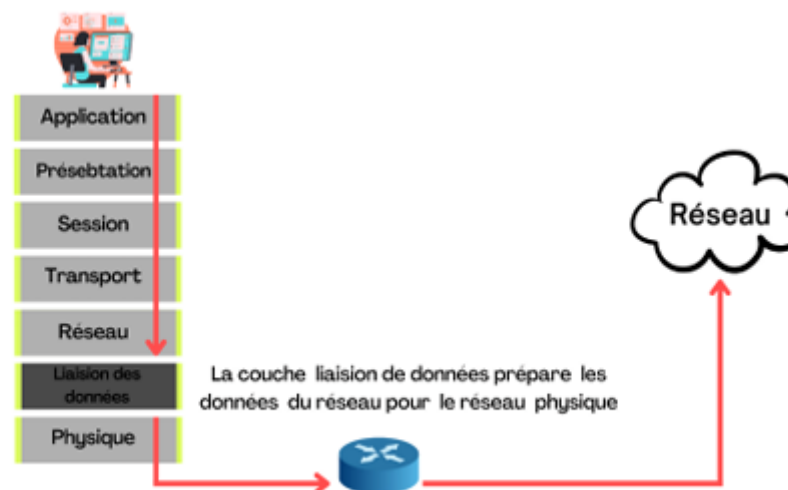


Figure 11: Le rôle de la couche liaison de données.

12.1.3. Couche réseau :

Les nœuds capteurs sont déployés de manière dense et aléatoire dans une zone afin de surveiller un phénomène spécifique. Pour permettre la communication avec le nœud puits, des protocoles de routage multi-sauts sont utilisés. La conception de la couche réseau doit répondre à trois exigences majeures : une gestion optimisée de l'énergie pour prolonger la durée de vie des capteurs, une architecture centrée sur les données pour assurer une collecte et un traitement efficace des informations, et un mécanisme de localisation pour améliorer le routage et la précision des transmissions.

12.1.4. Couche transport :

Cette couche agit comme un intermédiaire entre la couche application et la couche réseau. Elle assure plusieurs fonctions essentielles, notamment le multiplexage et le démultiplexage des messages, la gestion des données à un niveau supérieur et le découpage des informations en paquets. Son rôle est particulièrement important lorsque le réseau de capteurs est connecté à Internet ou à d'autres réseaux externes. Étant donné les contraintes d'énergie et de mémoire des capteurs, le protocole TCP n'est pas adapté aux communications internes du réseau. Ainsi, les échanges entre les utilisateurs et le nœud central peuvent se faire via TCP ou UDP, tandis que la communication entre le nœud central et les capteurs repose principalement sur le protocole UDP.

12.1.5. Couche application :

La couche application regroupe les services et programmes utilisés sur un réseau de capteurs. Elle permet aux utilisateurs d'accéder aux données collectées et d'interagir avec le réseau via différentes interfaces. Cette interaction peut se faire localement ou à distance, notamment en passant par un réseau plus large comme l'internet, facilitant ainsi la gestion et l'exploitation des informations issues des capteurs.

13. Conclusion :

Ce chapitre a offert une présentation approfondie des réseaux de capteurs sans fil, en mettant en évidence leur diversité ainsi que leurs modes de fonctionnement. Cette exploration a permis de mieux comprendre leurs caractéristiques et spécificités. De plus, nous avons abordé les capteurs eux-mêmes, en détaillant leurs usages et leurs domaines d'application.

Chapitre 2 : Les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil reposent sur des protocoles de routage spécifiques pour assurer la transmission efficace des données tout en minimisant la consommation énergétique. Ce chapitre vise à explorer les différentes approches de routage existantes, en mettant en évidence leur classification selon divers critères. Il aborde également les défis majeurs liés au routage dans les RCSF, et se termine par une comparaison entre les principales familles de routage : hiérarchique, plat et géographique.

2. Définition de routage

Le routage vise à déterminer un trajet permettant d'acheminer un message depuis la source jusqu'à la destination. Dans le contexte des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs), ce processus doit être optimisé sur le plan énergétique. Il est donc essentiel d'identifier un chemin qui minimise la consommation d'énergie tout en conservant une distance raisonnable entre les nœuds [7].

3. Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

Pour assurer la communication au sein d'un réseau de capteurs, l'utilisation d'un protocole de routage reposant sur la communication multi-sauts s'avère indispensable. Il existe cependant une grande variété de protocoles, chacun reposant sur des principes de fonctionnement distincts, en fonction de l'approche adoptée. Ces approches se différencient généralement selon trois critères principaux : la structure du réseau, les objectifs visés par les protocoles, et la méthode d'établissement des routes. La figure suivante illustre les différentes catégories d'approches de routage dans les réseaux de capteurs [8].



Figure 12: Les approches de routage dans les réseaux de capteurs.

3.1. Classification selon la structure du réseau :

Les protocoles de routage, selon la structure adoptée par le réseau, peuvent être regroupés en trois grandes catégories [8].

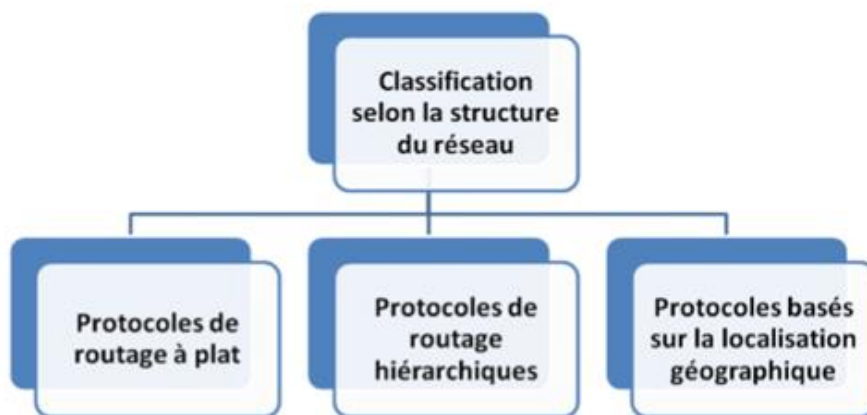


Figure 13 : Classification selon la structure du réseau.

3.1.1. Routage hiérarchique :

Ces protocoles attribuent des fonctions spécifiques aux différents nœuds du réseau, rompant ainsi avec l'homogénéité fonctionnelle. Le routage hiérarchique repose principalement sur l'organisation en clusters, chacun étant dirigé par un chef de cluster (cluster-head).

Dans ce schéma, les nœuds sont regroupés en clusters, et le chef de chaque cluster est responsable de la collecte des données issues de son groupe, puis de leur transmission vers d'autres chefs de clusters, jusqu'à ce que les informations atteignent la destination

finale.

La sélection du cluster head peut se faire de différentes manières : par rotation régulière entre les nœuds, en choisissant celui ayant le plus grand nombre de voisins, ou encore en tenant compte du niveau d'énergie résiduelle de chaque nœud, entre autres critères [7].

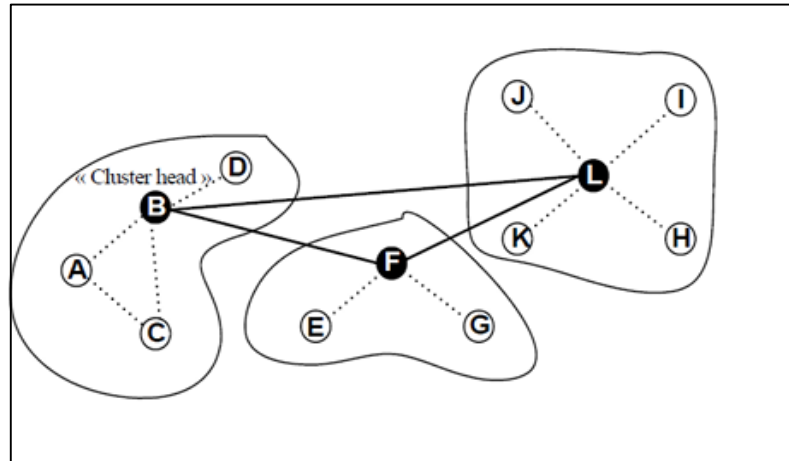


Figure 14 : Routage hiérarchique

Ce mode de routage présente plusieurs avantages, notamment lorsqu'il est appliqué à des réseaux composés de nœuds fixes disposant d'une réserve énergétique suffisante.

Avantages du routage hiérarchique :

- ✚ Bonne scalabilité pour les grands réseaux.
- ✚ Économie d'énergie (surtout en réseaux de capteurs)
- ✚ Isolation des pannes entre zones

Inconvénients du routage hiérarchique :

- ✚ Complexité de mise en œuvre
- ✚ Convergence plus lente en cas de changement
- ✚ Risque de boucles de routage

3.1.2. Routage basé sur la localisation (Géographique)

Ce paradigme s'applique principalement aux applications où l'interrogation du réseau repose sur la localisation des nœuds. Il permet d'exploiter la position géographique des nœuds pour optimiser le processus de routage, notamment en réduisant le nombre de

messages transmis. Avant d'envoyer ses données, un nœud source doit donc connaître sa propre position à travers un mécanisme de localisation. Le choix de cette méthode de localisation dépend du niveau de précision exigé par l'application concernée [7].

Connaît non seulement sa propre position, mais aussi celle de ses voisins. Cette information est utilisée pour orienter les messages vers la zone où se trouve la destination.

Un routage est dit basé sur la localisation lorsque les décisions de cheminement des paquets dépendent de la position géographique des nœuds. On distingue généralement trois stratégies principales :

- ✚ **Par progression** : le prochain nœud est celui dont la projection est la plus avancée vers la destination,
- ✚ **Par distance** : on choisit le nœud le plus proche de la destination en termes de distance euclidienne,
- ✚ **Par direction** : le prochain nœud est celui dont la position est la plus alignée avec la ligne droite reliant la source à la destination.

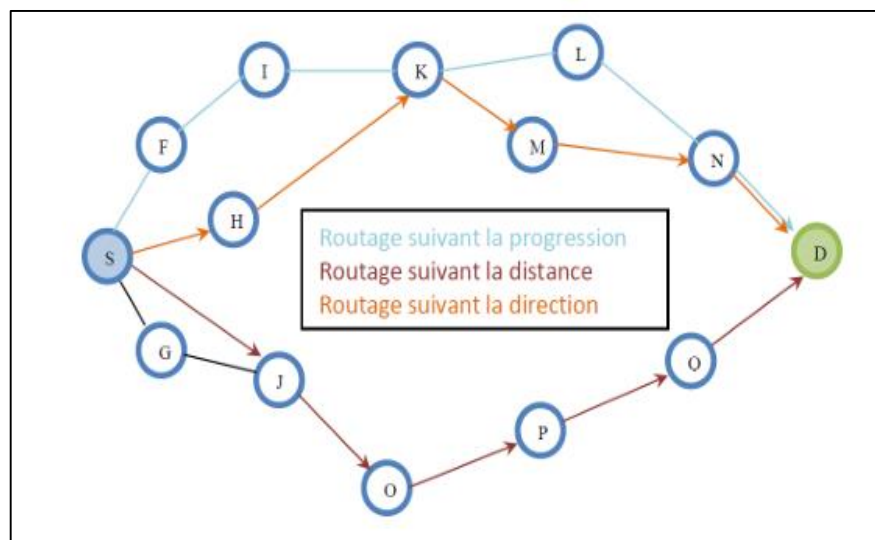


Figure 15 : Routage basé sur la localisation (Géographique).

Avantages

- ✚ Permet une meilleure efficacité énergétique en limitant la diffusion inutile des messages.
- ✚ Réduit le coût de contrôle grâce à des décisions de routage plus ciblées.

- ✚ Prolonge la durée de vie du réseau en mettant en veille les nœuds redondants (ex. : protocole GAF).
- ✚ S'adapte bien à la mobilité des nœuds ou du sink en utilisant les coordonnées plutôt que des tables fixes.

Inconvénients

- ✚ Nécessite une localisation précise, souvent obtenue via des dispositifs coûteux et énergivores.
- ✚ Génère une consommation énergétique supplémentaire liée à l'échange périodique de messages "Hello".

3.1.3. Routage plat (flat based-routing)

Ces protocoles partent du principe que l'ensemble des nœuds du réseau possèdent les mêmes capacités fonctionnelles, à l'exception du nœud principal, appelé sink, dont le rôle a centralisé les données recueillies par les capteurs pour ensuite les transmettre à l'utilisateur final. Le choix d'un nœud pour acheminer les paquets vers un autre n'est pas fixe : il est influencé par la position actuelle des nœuds et peut évoluer au fil du temps [7].

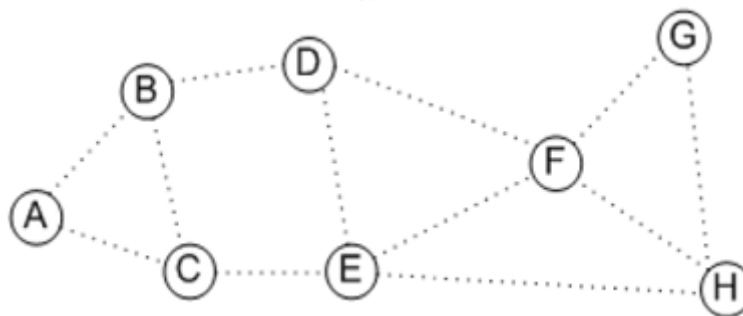


Figure 16 : Routage plat (flat based-routing).

Avantages :

1. Facile à installer, bon pour les petits réseaux.

Inconvénients :

2. Surcharge de routage due à l'absence de hiérarchie.
3. Peu adapté aux grands réseaux.

3.2. Classification selon la manière d'établissement de route

En fonction de la méthode utilisée pour établir et maintenir les chemins de communication, les protocoles de routage peuvent être classés en trois grandes catégories : les protocoles proactifs, réactifs et hybrides [8].

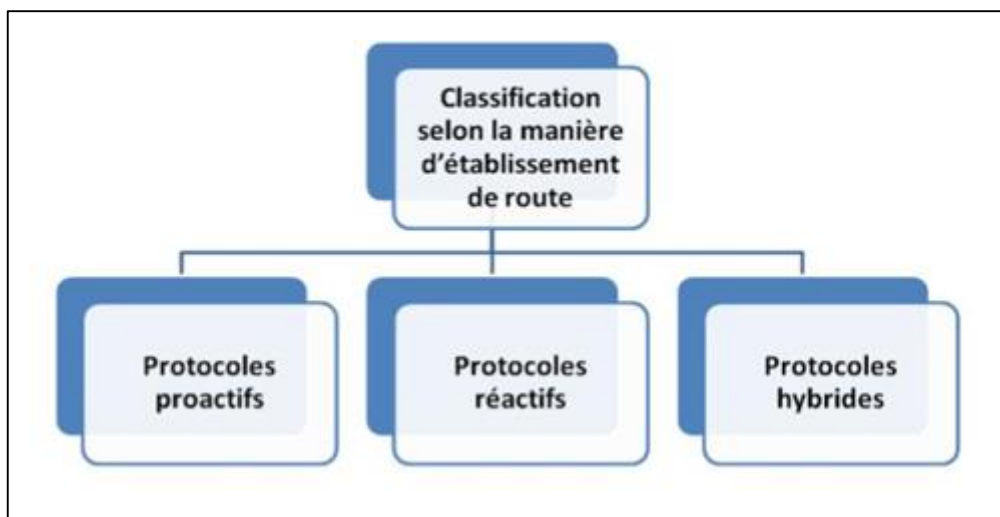


Figure 17 : Classification selon la manière d'établissement de route.

3.2.1. Protocole proactif

Un protocole proactif est un type de protocole de routage qui établit les tables de routage à l'avance, c'est-à-dire avant même qu'une requête de transmission de données ne soit faite. Il maintient en permanence une vue actualisée de la topologie du réseau, ce qui permet à chaque nœud de savoir comment atteindre les autres nœuds à tout moment [8].

Les avantages	Les inconvénients
Routes disponibles immédiatement.	Trafic élevé de mise à jour.
Gain de temps à l'établissement.	Gaspillage de bande passante.

Tableau 1: Avantages et inconvénients des protocoles proactif.

3.2.2. Protocole réactif

Un protocole réactif est un protocole de routage qui crée la table de routage uniquement lorsque cela est nécessaire, c'est-à-dire lorsqu'un nœud initie une demande de communication. Contrairement au protocole proactif, il ne dispose pas d'une connaissance préalable de la topologie du réseau. Il découvre dynamiquement le chemin à suivre vers un nœud cible uniquement au moment où une requête est faite [8].

Les avantages	Les inconvénients
Économie de ressources.	Délai à la création de route.
Pas de mise à jour pour les routes inutilisées.	Coût élevé de découverte.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des protocoles réactif.

3.2.3. Protocoles hybrides :

Ces protocoles tirent parti des avantages des approches proactives et réactives. Ils utilisent une stratégie proactive pour maintenir à jour les informations concernant les nœuds voisins, généralement jusqu'à deux sauts. Au-delà de cette zone locale, ils adoptent une approche réactive pour la découverte des routes vers des destinations plus éloignées. Un exemple représentatif de cette catégorie est le protocole ZRP (Zone Routing Protocol) [8].

3.3. Classification selon les modes opératoires :

Les protocoles de routage peuvent être classés en trois catégories, en fonction de leur mode de fonctionnement [8].

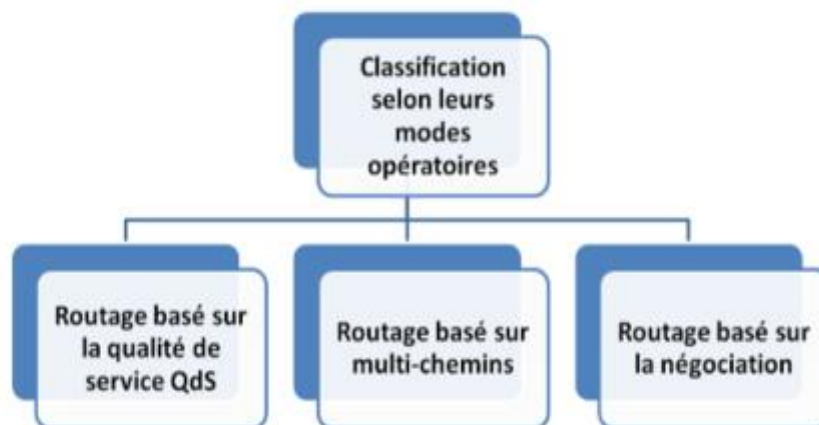


Figure 18 : Classification selon leurs modes opératoires.

3.3.1. Routage multi-chemins

Les protocoles multi-chemins visent à améliorer la fiabilité en utilisant plusieurs routes simultanément. En cas de défaillance d'un chemin, les données peuvent emprunter une autre voie, assurant ainsi une meilleure résilience du réseau [8].

3.3.2. Routage basé sur la négociation

Ce type de routage repose sur des mécanismes de négociation entre nœuds afin d'éviter la duplication des données. Des échanges de messages (publicité, requête, données) permettent aux nœuds de prendre des décisions en tenant compte de leurs ressources disponibles [8].

3.3.3. Protocoles de routage orientés qualité de service (QoS)

Ces protocoles cherchent à garantir un certain niveau de performance dans la transmission des données, tout en tenant compte de la consommation énergétique. Lorsqu'une demande est émise par le puits (sink), les informations doivent être transmises en respectant des contraintes spécifiques, comme une faible latence ou une bande passante suffisante. SAR est l'un des premiers protocoles à avoir intégré ces critères QoS dans les réseaux de capteurs [8].

4. Les défis du routage dans les RCSF

4.1. La consommation d'énergie :

Dans les réseaux de capteurs sans fil, chaque nœud fonctionne avec une source d'énergie limitée, souvent non rechargeable. Ainsi, la préservation de cette énergie devient un objectif prioritaire. Les protocoles de routage doivent donc être conçus pour limiter les activités énergivores comme l'émission fréquente de messages, les calculs complexes ou les communications inutiles. Réduire ces dépenses énergétiques prolonge la durée de vie du réseau dans son ensemble [9].

4.2. Extensibilité :

À mesure que le nombre de nœuds dans le réseau augmente, il devient difficile, voire inefficace, de maintenir une vision globale de la topologie. Les protocoles de routage doivent alors être capables de s'adapter dynamiquement à une croissance importante du réseau, sans nécessiter d'informations précises sur la localisation de chaque nœud. Cela implique que les nœuds puissent traiter les communications avec un grand nombre de voisins sans compromettre leur efficacité énergétique ni surcharger leurs ressources [9].

4.3. Adressage :

L'identification des nœuds dans un réseau est essentielle pour assurer la communication entre eux. Cependant, lorsque le réseau devient très dense, l'adressage individuel peut devenir inefficace, notamment dans les communications de type multi-sauts, où les messages doivent passer par plusieurs nœuds intermédiaires. Cette accumulation d'informations d'adresses peut surcharger le réseau. Les protocoles de routage doivent alors privilégier des stratégies légères, où la connaissance explicite de chaque adresse n'est pas indispensable, afin de limiter la surcharge (overhead) et préserver les performances globales du réseau [9].

4.4. Robustesse :

Le bon fonctionnement du routage dépend de la fiabilité des nœuds. Or, dans un environnement réel, des défaillances peuvent survenir à cause d'un défaut matériel ou d'une mauvaise qualité du canal de communication. Pour faire face à ces imprévus, les protocoles de routage doivent être capables de détecter les erreurs, de contourner les nœuds défaillants et d'adapter leur fonctionnement sans perturber la transmission des données. Cette capacité d'adaptation est essentielle pour garantir la continuité et la fiabilité du réseau, même en cas de perte de paquets ou d'interruptions locales [9].

4.5. Topologie :

Les capteurs dans un réseau sans fil peuvent être installés de manière planifiée ou dispersés de façon aléatoire, comme c'est souvent le cas dans les environnements non contrôlés. Cette disposition imprévisible empêche les nœuds d'avoir une vision initiale claire de leur voisinage. Par conséquent, les protocoles de routage doivent intégrer des mécanismes intelligents permettant à chaque capteur de découvrir et de maintenir à jour les informations sur ses voisins directs. Cette adaptation est d'autant plus importante dans les réseaux où certains nœuds sont mobiles, car la structure du réseau devient alors dynamique et nécessite une réévaluation fréquente des chemins de communication [9].

4.6. Application :

Les caractéristiques et les exigences de l'application finale déterminent en grande partie le comportement attendu du routage. Par exemple, dans les systèmes de surveillance ou de contrôle en continu, les capteurs envoient régulièrement des données, ce qui demande des itinéraires fixes et fiables. En revanche, dans les systèmes déclenchés par des événements (comme une détection de mouvement ou de fumée), les capteurs restent inactifs jusqu'à ce qu'un événement survienne. À ce moment, une communication

rapide et efficace doit être initiée, ce qui impose la mise en place dynamique des chemins de transmission dès le premier signal [9].

5. Comparaison entre Routage Hiérarchique & Routage Plat & Routage Géographique :

Ce tableau compare les types de routage hiérarchique, plat et géographique selon leurs principales caractéristiques dans les réseaux de capteurs sans fil [10] [11] [12].

Critère	Routage Hiérarchique	Routage Plat	Routage Géographique
Organisation du réseau	Réseau divisé en clusters avec cluster-heads	Tous les nœuds ont le même rôle	Utilise la position géographique des nœuds
Rôle des nœuds	Cluster-heads gèrent les communications locales et agrègent les données	Tous les nœuds participent également au routage	Routage basé sur la localisation, choix du prochain saut selon la position
Consommation d'énergie	Optimisée grâce à l'agrégation et réduction des transmissions	Plus élevée car chaque nœud relaie les données	Réduit les transmissions inutiles par routage directionnel
Complexité	Plus complexe à gérer (élection des cluster-heads, formation de clusters)	Simple à implémenter mais moins scalable	Complexité moyenne, nécessite connaissance de la position
Scalabilité	Bonne, adaptée aux grands réseaux grâce au partitionnement	Moins adaptée aux grands réseaux à cause du flooding	Bonne, évite l'inondation par routage localisé

Tolérance aux pannes	Moyenne, dépend de la fiabilité des cluster-heads	Bonne, car pas de dépendance à un nœud particulier	Moyenne, dépend de la précision des informations de localisation
-----------------------------	---	--	--

Tableau 3 : Comparaison des approches de routage : Hiérarchique, Plat et Géographique.

6. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté les grandes catégories de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, ainsi que les principaux défis qu'elles doivent relever. La comparaison finale entre les approches hiérarchique, plate et géographique met en évidence les spécificités et les performances de chacune selon le contexte d'application. Ces éléments préparent le terrain pour l'étude approfondie des protocoles LEACH, SEP et TSEP dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Etude des protocoles de routage LEACH, SEP et TSEP

1. Introduction

Dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN), le routage de l'information constitue un défi majeur, principalement en raison des contraintes énergétiques sévères qui limitent la durée de vie des réseaux. Parmi les diverses stratégies proposées, les protocoles hiérarchiques, basés sur la formation de clusters et la sélection de chefs de cluster (Cluster-Heads, CH), ont démontré une efficacité notable en matière d'économie d'énergie.

Ce chapitre présente une étude théorique approfondie de trois protocoles de routage hiérarchique parmi les plus populaires : LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), SEP (Stable Election Protocol) et TSEP (Threshold Sensitive Stable Election Protocol).

Nous analyserons leur fonctionnement interne, leurs mécanismes d'élection des CH, leurs avantages respectifs ainsi que leurs limitations. Une comparaison théorique sera également établie afin de mieux cerner leurs domaines d'application optimaux, préparant ainsi le terrain pour l'évaluation expérimentale au chapitre suivant.

2. Les protocoles de routage hiérarchiques

Dans les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks - WSN), la gestion efficace de l'énergie est essentielle pour prolonger la durée de vie globale du réseau. Les protocoles hiérarchiques de routage constituent une solution privilégiée à cette problématique. Leur principe fondamental repose sur l'organisation des nœuds capteurs en clusters, où chaque cluster est dirigé par un chef de cluster (Cluster-Head, CH).

Le fonctionnement général de ces protocoles suit une approche en deux étapes principales :

2.1. Phase de configuration :

Les nœuds élisent périodiquement un chef de cluster selon des critères spécifiques (énergie résiduelle, probabilité prédéfinie, seuils dynamiques...).

2.2. Phase de transmission :

Les nœuds membres transmettent leurs données au CH, qui les agrège pour ensuite les envoyer directement ou indirectement à la station de base.

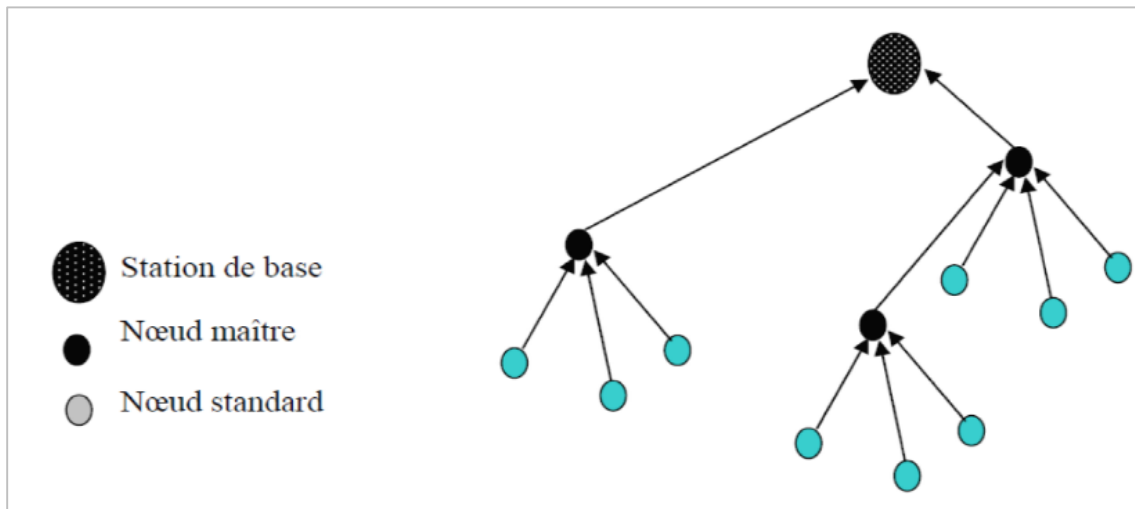


Figure 19 : Organigramme du processus de simulation.

3. Caractéristiques des protocoles hiérarchiques

3.1. Le Clustering :

Le clustering est une technique pour partitionner le réseau en groupes (Clusters) plus homogènes selon une métrique spécifique ou une combinaison de métriques, et former une topologie virtuelle.

Chaque groupe est désigné un leader (Cluster-Head) qui communique avec les membres de son groupe et les cluster Heads des autres groupes, d'agréger leurs données collectées et de les transmettre à la station de base.

Donc, la technique de clustering contribue énormément à l'économie de l'énergie, à la réduction de la complexité des protocoles de routage et à la résistance au facteur d'échelle, en plus de l'agrégation de données qui permet d'éliminer redondance de données et de n'envoyer que les informations utiles [13]. [1]

3.2. L'architecture en cluster

Les architectures en clusters sont largement utilisées dans les SWN pour leur capacité de passage à l'échelle. Cette structuration doit permettre une utilisation plus efficace des ressources rares du réseau telles que l'énergie et la bande passante, pour bien comprendre l'avantage des protocoles hiérarchique basé sur le clustering on doit d'abord présenter ces composants [14] [15].

3.2.1. Nœud capteur (Sensor Node : SN(s)) : L'ensemble des capteurs présents dans le réseau, conçus pour détecter et collecter les données.

3.2.2. Cluster : Groupe de noeuds capteurs qui forme l'unité organisationnelle du réseau.

3.2.3. Cluster Head : CH : Une passerelle entre les SNs et la station de base (BS). Le CH est considéré comme puits des noeuds d'un même cluster.

3.2.4. Station de base (Base Station : BS) : Est le point de traitement de données reçues des CHs, où l'utilisateur final accède aux données. La BS représente le puits des CHs.

3.2.5. Utilisateur final : Les données dans un réseau de capteurs peuvent être utilisées par une variété d'applications. Par conséquent, une application particulière peut utiliser les données du réseau via internet, un PDA ou même un ordinateur bureau

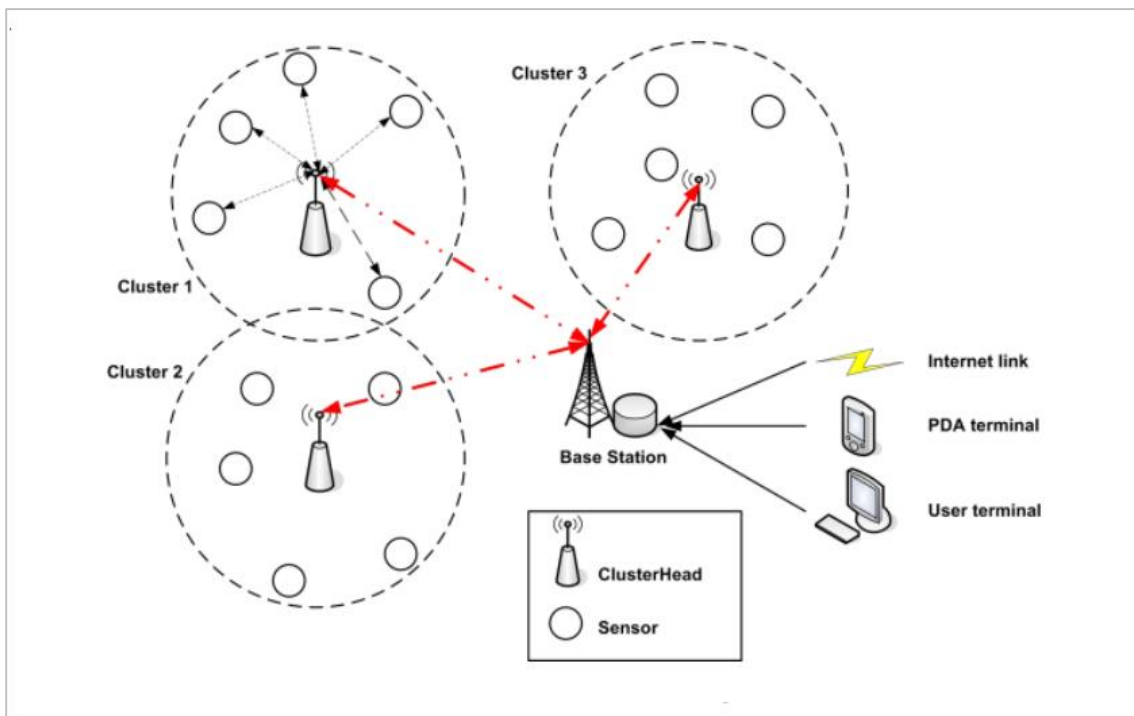


Figure 20 : Principaux composants d'une architecture en cluster.

3.3. La classification des clusters

Il existe plusieurs manières pour classifier les clusters. On peut les classer on se basant soit sur les fonctionnalités et les caractéristiques des noeuds, soit sur la forme des clusters :

3.3.1. Selon les caractéristiques et la fonctionnalité des noeuds : Dans cette classification, les clusters sont organisés selon les caractéristiques des

noeuds et leurs rôles. On distingue deux types de clusters : les clusters homogènes et les clusters hétérogènes.

- **Cluster homogène** : Dans ce type de cluster, tous les noeuds ont les mêmes caractéristiques, le même niveau d'énergie, la même capacité de calcul et le rôle de CH est périodiquement tournée entre tous les noeuds.
- **Cluster hétérogène** : Dans ce type de cluster, les noeuds n'ont pas les mêmes caractéristiques. Ils peuvent avoir des noeuds puissant en termes d'efficacité énergétique et le rôle de CH est attribué au noeuds puissant.

3.3.2. Selon la forme de cluster : Cette classification se base sur la méthode de formation des clusters soit d'une façon dynamique ou statique.

- **Cluster statique** : Dans ce type, les clusters sont formés lors de déploiement du réseau. Le choix de CH et le déploiement des membres de cluster et ses tailles sont tous statique.
- **Cluster dynamique** : Dans ce type, les noeuds peuvent changer leur appartenance à un cluster à tous moments [14].

3.4. Processus d'établissement des clusters

Dans tous les protocoles de routage hiérarchique, trois phases principales peuvent être identifiées au cours du processus d'établissement du clustering : la phase d'élection du CH, la phase de formation de cluster et la phase de transmission des données (phase de communication).

3.4.1. Phase d'élection de CH :

Dans cette phase, chaque nœud diffuse périodiquement ses informations aux nœuds qu'ils sont capables de le détecter pour former une base d'information. En se basant sur cette dernière, les CHs seront sélectionnés. Le rôle de CH est généralement d'agréger et de transférer les données collectées par ces membres à la station de base.

3.4.2. Phase de formation de cluster :

La phase de formation des clusters est une phase de collecte d'informations et de prise de décision du rôle à jouer par chaque noeud. La durée de cette phase mesurée en nombre de tours qui demeure une métrique importante et représente un coût considérable dans un algorithme de clusterisation.

3.4.3. Phase de transmission :

Dans cette phase, Les nœuds communiquent leurs données vers les CHs correspondant pendant un intervalle de temps prédéfini. Les données perçues au niveau de chaque CH sont agrégées puis transmises directement vers la SB [14].

3.5. Communication inter-cluster

Les clusters Head peut communiquer avec la base station soit directement, soit en multi-saut (deux ou plusieurs) via des noeuds Gateway. Ces derniers peuvent être des clusters Head ou des clusters membres. La communication multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalabilité du réseau [15].

3.6. Communication intra-cluster

C'est la communication des nœuds capteurs et du Cluster Head élu au sein du cluster. Il peut s'agir d'un seul saut qui dépend de la distance entre le nœud et le CH ou de plusieurs sauts qui sont généralement utilisés dans les réseaux à grande échelle.

Nombre de clusters : il s'agit d'un paramètre clé concernant l'efficacité de l'algorithme de clustering, qui varie en fonction de la taille du réseau [15].

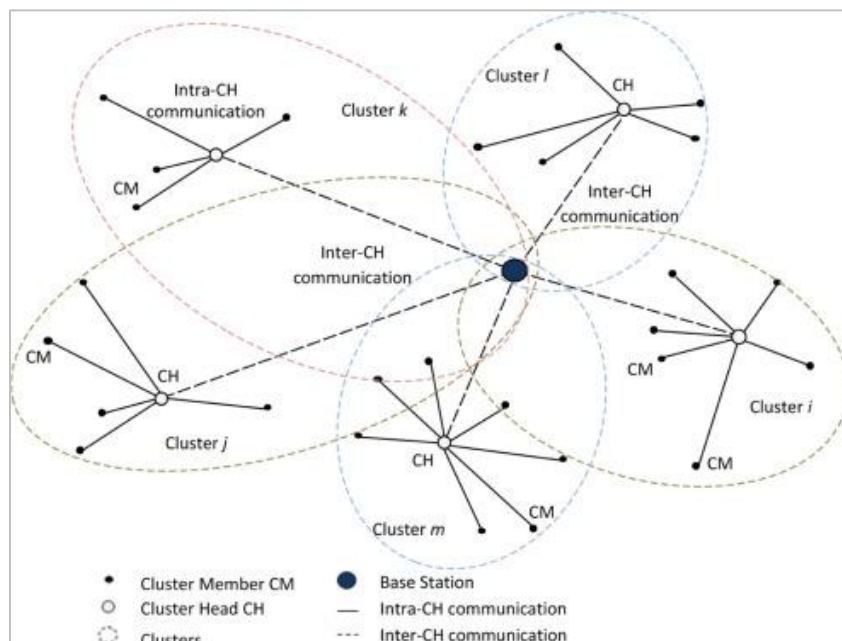


Figure 21 : Principaux composants d'une architecture en cluster.

4. LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est le premier protocole de routage hiérarchique utilisant le TDMA (Time Division Multiple Access) pour implémenter un routage économe en énergie dans le WSN. Le protocole LEACH permet un mécanisme de clustering qui forme un ensemble de nœuds en fonction de la puissance du signal reçu. Cet ensemble de nœuds est également appelé cluster, chaque nœud étant dédié à un nœud opportuniste supplémentaire appelé Cluster-Head (CH). Ce CH fait office de centre de données local pour tous les clusters et utilise la planification TDMA et CDMA pour transmettre des données agrégées à la station de base (BS) sans collisions intra-trame et inter-trame [16].

Ses caractéristiques principales se résument dans [17] :

- Protocole basé sur le clustering
- Configuration de cluster auto-orientée
- Configuration de cluster adaptative et aléatoire
- Contrôles localisés pour l'organisation du cluster et les opérations de transfert de données
- Accès aux données à faible consommation
- Agrégation de données
- Compression locale pour minimiser la communication globale

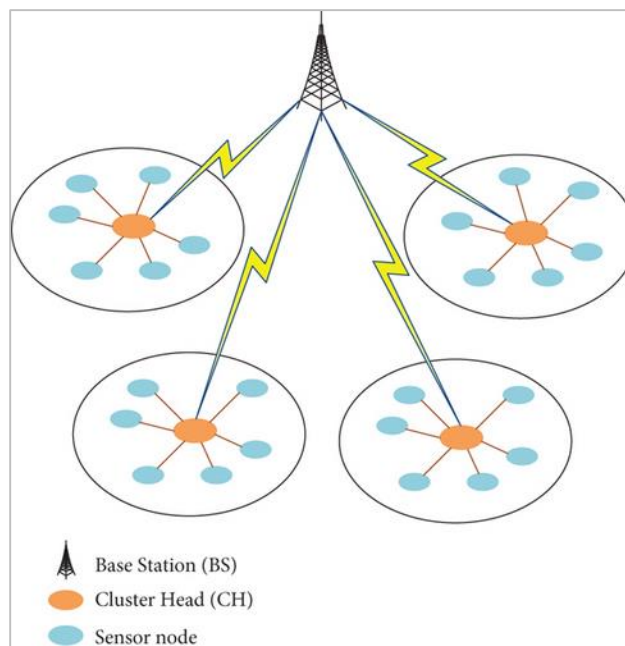


Figure 22 : Architecture de communication LEACH.

4.1. Fonctionnement de LEACH

Le protocole LEACH utilise le principe de clustering en divisant le réseau en deux niveaux : les cluster-heads et les nœuds membres. Le protocole se déroule en round (ou tour). Chaque round se compose de deux phases : construction et communication.

4.1.1 Phase de configuration (setup phase)

Divisée en trois sous phases : La sélection de CH, formation de cluster et assignation de TDMA (Time-division multiple access).

- **La sélection de CH** : Dans un premier temps, lors de la création des clusters, chaque nœud décide s'il devient ou non chef de cluster pour le cycle en cours. Cette décision est basée sur le pourcentage suggéré de cluster Head pour le réseau (déterminé a priori) et le nombre de fois que le nœud a été CH jusqu'à présent. Chaque nœud choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1, si le nombre est inférieur à un seuil $T(n)$ le nœud devient CH pour le tour courant. Le seuil est défini comme suit :

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

Où :

- ✓ p : probabilité désirée de CH,
 - ✓ r : numéro actuel du round,
 - ✓ G : ensemble des nœuds qui n'ont pas été CH dans les $1/p$ derniers rounds.
-
- **Formation de cluster** : A la fin de processus de sélection, chaque CH émet un message de notification afin de permettre aux nœuds non CH de décider l'appartenance ou non à son cluster. La décision se fait sur la base de la force du signal reçu (RSSI), le CH avec le signal le plus fort sera choisi.

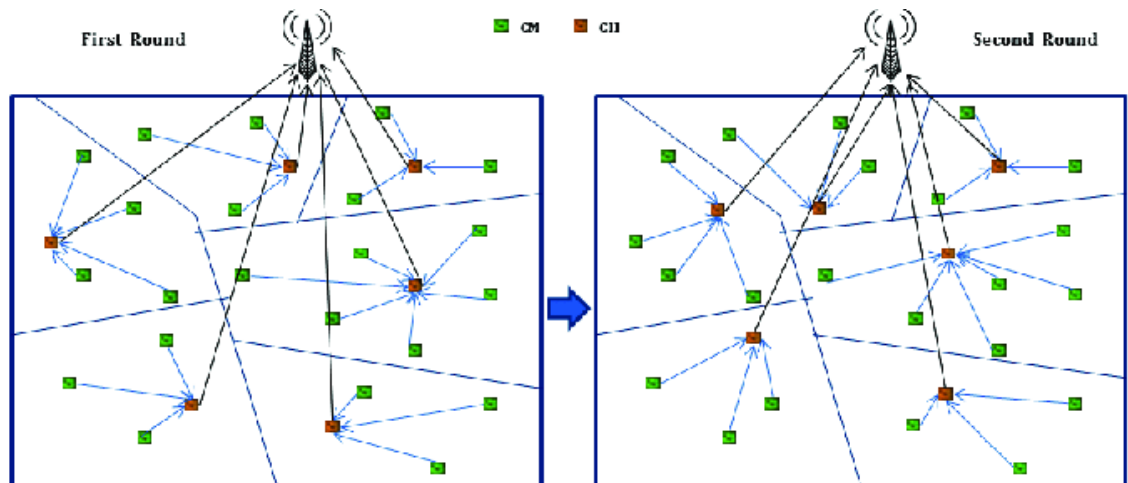


Figure 23 : Protocole LEACH avec deux tours différents

- **Assigination de TDMA :** Chaque CH crée un planning de schedule TDMA et le transmet vers tous ses membres. Ce schedule définit le temps (slot) réservé pour chaque membre de cluster pour transmettre ses données au CH [14].

4.1.2 Phase de communication (steady phase)

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 à la station de base. Cette communication, entre un cluster-head et la station de base, se fait d'une manière directe, i.e. : le cluster-head adapte son émetteur radio afin d'atteindre directement la station de base [18].

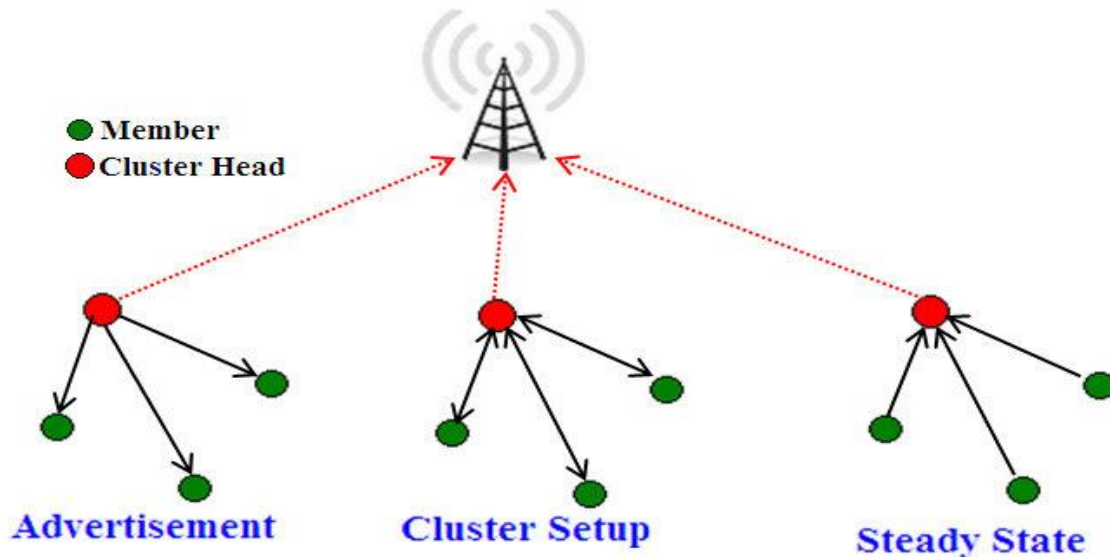


Figure 24 : Les différentes phases de LEACH.

4.2. Interférences entre clusters

Afin de réduire les interférences entre les signaux émis par les membres de différents clusters, chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA et informe ses membres de son cluster afin de l'utiliser dans leurs transmissions. Chaque CH reconnaît les signaux de ses membres à travers ces codes [14].

4.3. Avantages de LEACH

Bien que LEACH économise la consommation énergie, LEACH a plusieurs avantages parmi les nous citons :

- ✓ Le protocole LEACH utilise un mécanisme de clustering qui allège la charge de communication entre les capteurs et le récepteur.
- ✓ Le CH agrège les données, minimisant ainsi le facteur de redondance et économisant de l'énergie. Dans ce cas, le CH utilise un processus de planification qui permet aux nœuds membres de passer en mode veille. Cela évite les collisions et préserve la consommation d'énergie.
- ✓ Le protocole LEACH permet également à chaque nœud capteur du cluster de devenir le CH.
- ✓ La rotation aléatoire du CH améliore également la durée de vie du réseau.
- ✓ Il permet également d'économiser de l'énergie grâce à un routage à saut unique du capteur au CH.
- ✓ LEACH ne nécessite pas la localisation des nœuds pour s'établir comme CH.

- ✓ LEACH est indépendant et distribué, ce qui ne nécessite pas d'informations de contrôle du nœud récepteur.

4.4. Inconvénients de LEACH

Parmi les inconvénients présentés par LEACH on cite [19]:

1. Les CHs ne sont pas uniformément distribués dans le cluster, ce qui résulte l'isolement de certain nœud s'ils n'ont pas de CH dans leurs voisinages.
2. On ne peut pas avoir des CHs durant un round si la probabilité générée est supérieure à $T(n)$.
3. Les CHs éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proche de la station de base.

5. SEP (Stable Election Protocol)

SEP (Stable Election Protocol) est une amélioration du protocole LEACH destinée aux réseaux de capteurs sans fil hétérogènes. Contrairement à LEACH, qui suppose que tous les nœuds disposent de la même énergie initiale, SEP introduit une prise en compte de l'hétérogénéité énergétique dès la phase de sélection des chefs de cluster (CH - Cluster Heads).

SEP est principalement conçu pour :

- Améliorer la stabilité du réseau (période avant la mort du premier nœud).
- Équilibrer l'utilisation de l'énergie entre nœuds à capacités différentes.

Il répartit plus intelligemment le rôle de CH en fonction de l'énergie disponible, ce qui prolonge la durée de vie du réseau et améliore la fiabilité globale.

5.1. Fonctionnement de SEP

Le fonctionnement de SEP repose sur deux principes fondamentaux :

5.1.1. Phase de Sélection des Chefs de Cluster (CH)

SEP introduit une sélection probabiliste pondérée pour tenir compte de l'hétérogénéité énergétique. Le processus se décompose comme suit :

a) Classification des Nœuds :

- ❖ **Nœuds normaux** : avec une énergie initiale E_0 (suivent le modèle LEACH classique).

- ❖ **Nœuds avancés** : disposant d'une énergie initiale plus élevée, $E_0(1+a)$, où $a > 0$ représente le facteur d'augmentation énergétique.

b) Calcul des Probabilités :

Les nœuds avancés ont une plus grande probabilité d'être sélectionnés comme chefs de cluster par rapport aux nœuds normaux. Ceci garantit que les nœuds ayant plus d'énergie participent davantage à l'organisation du réseau, tout en préservant l'énergie des nœuds plus faibles.

La probabilité de devenir CH est ajustée dynamiquement :

- **Pour les nœuds normaux** : Probabilité de devenir CH réduite

$$p_{\text{norm}} = \frac{p}{1 + \alpha \cdot m}$$

- **Pour les nœuds avancés** : Probabilité augmentée.

$$p_{\text{adv}} = \frac{p \cdot (1 + \alpha)}{1 + \alpha \cdot m}$$

Où :

- p = probabilité de base (comme dans LEACH).
- α = surplus d'énergie des nœuds avancés.
- m = fraction de nœuds avancés dans le réseau.

c) Mécanisme d'Élection de CH's :

Seuil de sélection d'un nœud n pour devenir CH (formule équivalente à celle de LEACH mais ajustée) :

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

Où G est l'ensemble des nœuds non élus comme CH durant la dernière période de $1/p$ rounds, et p est soit p_{norm} soit p_{adv} .

5.1.2. Phase de Formation des Clusters

- ✓ Une fois qu'un nœud se déclare CH, il diffuse un message d'annonce (advertisement message) aux autres nœuds du réseau.
- ✓ Les nœuds non-CH décident à quel cluster appartenir en fonction de la force du signal reçu des différents CH. Ils rejoignent le cluster du CH dont le signal est le plus fort.
- ✓ Chaque nœud membre informe son CH de son appartenance.
- ✓ Le CH crée ensuite un ordonnancement temporel (TDMA schedule) pour les nœuds membres de son cluster, afin d'éviter les collisions lors de la transmission des données.

5.2. Transmission des données en SEP

Durant la phase de transmission des données, qui suit la formation des clusters et l'établissement d'un ordonnancement temporel basé sur l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) par le chef de cluster (CH), chaque nœud membre transmet les données sensorielles qu'il a collectées de son environnement pendant l'intervalle de temps qui lui est spécifiquement alloué.

Cette organisation temporelle évite les collisions potentielles entre les transmissions des différents nœuds membres appartenant au même cluster. Une fois que le CH a reçu les données de tous les nœuds membres de son cluster, il effectue une agrégation des données.

Ce processus crucial consiste à traiter et à combiner les informations reçues afin d'éliminer la redondance, d'extraire les caractéristiques pertinentes et de réduire le volume global de données qui doit être transmis ultérieurement, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie significatives.

Enfin, le CH, agissant comme un point de collecte local pour son cluster, transmet ces données compressées et agrégées directement à la station de base (BS).

5.3. Avantages de SEP

- ✓ Prolongation de la période de stabilité : En donnant une plus grande probabilité d'élection aux nœuds ayant plus d'énergie, SEP retarde la mort du premier nœud du réseau, ce qui est crucial pour de nombreuses applications nécessitant une surveillance continue.
- ✓ Amélioration de la durée de vie du réseau : La distribution plus équilibrée de la charge énergétique entre les nœuds normaux et avancés permet d'exploiter plus efficacement les ressources énergétiques du réseau.
- ✓ Simplicité relative : Bien qu'il prenne en compte l'hétérogénéité, le mécanisme d'élection probabiliste reste relativement simple à implémenter.

5.4. Inconvénients de SEP

- Dépendance de la connaissance de l'hétérogénéité : Le protocole suppose que les nœuds connaissent leur type (normal ou avancé) et la proportion des différents types dans le réseau.
- Surcharge potentielle des CH : Les têtes de cluster sont responsables de la réception, de l'agrégation et de la transmission des données, ce qui peut entraîner une consommation d'énergie plus rapide pour ces nœuds, même s'ils ont initialement plus d'énergie.
- Problèmes potentiels de couverture : La formation aléatoire des clusters peut entraîner des clusters mal répartis ou des nœuds isolés.

6. TSEP (Threshold-sensitive Stable Election Protocol)

TSEP (Threshold-sensitive Stable Election Protocol) est une évolution du SEP et du TEEN, conçu spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil hétérogènes en introduisant un troisième niveau d'hétérogénéité en termes d'énergie des nœuds. Alors que SEP considérait deux types de nœuds (normaux et avancés), TSEP en distingue trois:

- **Nœuds Normaux** : Ils possèdent la quantité d'énergie initiale de base (E_0), tout comme dans SEP.
- **Nœuds Avancés** : Ils ont une quantité d'énergie initiale supérieure aux nœuds normaux, généralement $E_0(1+\alpha)$, où $\alpha > 0$.

- **Super-Nœuds** : TSEP introduit un troisième type de nœuds, les super-nœuds, qui sont équipés d'une quantité d'énergie initiale encore plus élevée que les nœuds avancés, typiquement $E_0(1+\beta)$, où $\beta > \alpha > 0$. La proportion de ces super-nœuds dans le réseau est généralement faible.

TSEP vise à maximiser la durée de vie du réseau, à réduire la consommation énergétique en limitant la transmission des données uniquement aux changements significatifs, et à améliorer la stabilité ainsi que l'efficacité dans les environnements stables.

6.1. Élection des Cluster Heads (CH) Sensible au Seuil

La principale différence de TSEP par rapport à SEP réside dans le mécanisme d'élection des Cluster Heads (CH), qui devient sensible à un seuil (threshold-sensitive). TSEP utilise deux types de seuils pour déterminer si un nœud peut devenir une CH :

- **Seuil Dur (Hard Threshold - HT)** : Ce seuil est fixe et basé sur l'énergie initiale des nœuds de chaque type. Un nœud ne peut devenir CH que si son énergie actuelle dépasse ce seuil dur. L'idée est d'empêcher les nœuds ayant une énergie trop faible de devenir CH et de mourir prématurément.
- **Seuil Doux (Soft Threshold - ST)** : Si l'énergie d'un nœud dépasse le seuil dur, la probabilité qu'il devienne CH est alors déterminée par un seuil doux, qui est similaire au mécanisme probabiliste utilisé dans SEP, mais adapté aux trois niveaux d'énergie. Ce seuil doux peut également évoluer au fil des cycles en fonction du nombre de fois où un nœud a déjà été CH.

La probabilité d'élection comme CH est donc plus élevée pour les nœuds ayant plus d'énergie (super-nœuds en premier lieu, suivis des nœuds avancés, puis des nœuds normaux), mais cette élection est conditionnée par le dépassement du seuil dur.

6.2. Fonctionnement de TSEP

L'algorithme TSEP est divisé en deux phases : la phase de configuration et la phase de transmission des données.

6.2.1. Phase de configuration (setup phase)

Lors de la phase de configuration, les nœuds du capteur sans fil sont déployés aléatoirement dans le réseau, chacun étant situé à un emplacement différent de la station de base. Durant cette phase, la probabilité de sélectionner une chef de cluster à chaque tour (Round) est directement liée à l'énergie initiale du nœud. La formule de probabilité

seuil permet de déterminer si chaque nœud devient une chef de cluster est la suivante :
[20]

$$T(s) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \times (r \bmod \lfloor 1/p \rfloor)} & \text{si } s \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où :

- p : Probabilité de devenir CH (différente par niveau hiérarchique)
- r : Round actuel
- G : Ensemble des nœuds éligibles (non-CHs récemment)

Les niveaux d'énergie de chaque nœud ont des probabilités différentes. Dans l'algorithme TSEP, les nœuds sont divisés en nœuds normaux, nœuds avancés et super nœuds, et leur probabilité est exprimée respectivement par :

$$P_{\text{norm}} = \frac{P_{\text{opt}}}{1 + \alpha \times m + \beta \times b}$$

$$P_{\text{adv}} = \frac{P_{\text{opt}}}{1 + \alpha \times m + \beta \times b} \times (1 + \beta)$$

$$P_{\text{sup}} = \frac{P_{\text{opt}}}{1 + \alpha \times m + \beta \times b} \times (1 + \alpha)$$

Où

- ✓ P_{opt} : la probabilité optimale que chaque nœud devienne une tête de cluster.
- ✓ α : l'énergie du super nœud α fois supérieure à celle du nœud normal.
- ✓ β est l'énergie du nœud avancé β fois supérieure à celle du nœud normal.
- ✓ m : la proportion de super nœuds par rapport au nombre total de nœuds n avec une énergie supérieure à celle du reste des nœuds.
- ✓ b : la proportion de nœuds avancés.

6.2.2. Phase de Transmission des Données

Après avoir sélectionné le chef de cluster, les chefs de cluster sélectionnés diffusent un message d'annonce à l'aide de l'algorithme d'accès multiple non persistant par détection de porteuse.

Après réception de ces messages, les autres nœuds non membres du cluster comparent la puissance du signal reçu afin de sélectionner le nœud présentant la puissance de signal la plus élevée comme chef de cluster.

Après réception du message de requête du nœud non membre du cluster, le chef de cluster établit une table de planification des créneaux temporels TDMA (accès multiple par répartition dans le temps).

Il envoie ensuite la planification au nœud non membre du cluster pour indiquer sa présence. L'envoi des données par le chef de cluster ne peut se faire que pendant un créneau temporel spécifique et jusqu'à la formation complète du cluster.

Lors de la phase de transmission des données, le chef de cluster envoie les données fusionnées dans le cluster directement à la station de base [21].

6.3. Avantages de TSEP

- ✓ Durée de vie du réseau encore améliorée : En introduisant un troisième niveau d'hétérogénéité et un mécanisme d'élection sensible au seuil, TSEP permet une gestion encore plus efficace de l'énergie, prolongeant ainsi la durée de vie globale du réseau par rapport à SEP. Les super-nœuds, avec leur énergie considérablement plus élevée, sont plus susceptibles de devenir CH pendant de plus longues périodes, répartissant davantage la charge.
- ✓ Période de stabilité accrue : Le seuil dur assure que seuls les nœuds ayant suffisamment d'énergie peuvent devenir CH, ce qui retarde la mort du premier nœud et prolonge la période de stabilité du réseau, une métrique importante pour de nombreuses applications.
- ✓ Meilleure gestion de l'hétérogénéité : TSEP exploite davantage l'hétérogénéité du réseau en donnant un rôle plus important aux nœuds les plus énergivores.

6.4. Inconvénients de TSEP

- Complexité accrue : L'introduction d'un troisième niveau d'hétérogénéité et de seuils d'élection rend le protocole plus complexe à analyser et à implémenter que SEP.

- Nécessité de connaître l'hétérogénéité : Comme SEP, TSEP suppose que les nœuds connaissent leur niveau d'énergie relative et la distribution des différents types de nœuds dans le réseau.
- Surcharge potentielle des super-nœuds : Bien qu'ils aient plus d'énergie, les super-nœuds pourraient être sollicités plus fréquemment comme CH, ce qui pourrait potentiellement entraîner leur épuisement plus rapide si le protocole n'est pas finement paramétré.
- Paramétrage délicat des seuils : Le choix des seuils dur et doux est crucial pour la performance de TSEP. Un mauvais paramétrage pourrait ne pas exploiter pleinement les avantages de l'hétérogénéité ou entraîner une sélection inefficace des CH.

7. Comparaison des Protocoles LEACH, SEP et TSEP

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques clés des trois protocoles étudiés LEACH, SEP et TSEP.

Critère	LEACH	SEP	TSEP
Type de réseau	Homogène	Hétérogène	Hétérogène dynamique
Sélection des CHs	Probabiliste	Pondérée	Seuils adaptatifs
Gestion énergétique	Rotation équitable	Priorité nœuds avancés	Optimisation en réel
Complexité	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$
Cas d'usage	Réseaux petits/denses	Réseaux mixtes	Réseaux étendus/variables

Tableau 4 : Comparaison Synthétique des Protocoles LEACH, SEP ET TSEP.

7. Conclusion

À travers cette étude théorique, nous avons mis en lumière les principes de fonctionnement, les stratégies de sélection des Cluster-Heads, ainsi que les forces et les faiblesses respectives des protocoles LEACH, SEP et TSEP.

Il ressort que :

- ✓ LEACH est simple et adapté aux réseaux homogènes nécessitant une faible latence, mais présente des limites en termes de durée de vie réseau.
- ✓ SEP introduit l'hétérogénéité énergétique pour améliorer la stabilité, en particulier dans des réseaux légèrement variés.
- ✓ TSEP va encore plus loin en utilisant des seuils dynamiques pour maximiser la longévité du réseau dans des environnements stables.

Ces observations théoriques, bien que prometteuses, nécessitent une validation pratique. Dans le prochain chapitre, nous procéderons donc à des simulations détaillées de ces protocoles dans un scénario réseau standard, afin d'analyser concrètement leurs performances selon plusieurs métriques critiques telles que l'énergie résiduelle, le taux de livraison de paquets (PDR) et la durée de vie du réseau.

**Chapitre 4 : Simulation et
Évaluation des Protocoles LEACH,
SEP et TSEP**

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) jouent un rôle crucial dans diverses applications, allant de la surveillance environnementale aux systèmes industriels intelligents. Cependant, leur efficacité dépend largement des protocoles de routage utilisés pour gérer la consommation d'énergie et la longévité du réseau. Dans ce chapitre, nous évaluons trois protocoles hiérarchiques emblématiques : LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), SEP (Stable Election Protocol), et TSEP (Threshold-Sensitive Stable Election Protocol), afin de comparer leurs performances sous une configuration d'un réseau standard. Cette étude vise à :

- Implémenter une simulation réaliste des trois protocoles sous MATLAB, en tenant compte des modèles énergétiques et des topologies variées.
- Comparer leurs performances via des métriques clés telles que : La durée de vie du réseau (First Node Death, FND), L'efficacité énergétique (Énergie moyenne résiduelle), La qualité de service (Packet Delivery Ratio, PDR).
- Valider statistiquement les résultats à l'aide de tests ANOVA pour identifier les différences significatives entre les protocoles.

2. Environnement e simulation

La simulation informatique est une technique permettant de modéliser le comportement d'un système réel à travers un programme informatique, en offrant une représentation de toutes les entités de ce système, leurs comportements propres, ainsi que leurs interactions. Elle met à la disposition de l'utilisateur un environnement d'expérimentation dont on peut faire varier les paramètres.

2.1. Environnement matériel

Pour le développement de notre simulation nous avons utilisé un PC portable « DELL Latitude » dont la configuration est la suivante :

1. Processeur : Intel(R) Core (TM) i5-5300U CPU @ 2.30GHz 2.30 GHz.
2. Mémoire installée (RAM) : 8.00Go.
3. Type du Système : Système d'exploitation 64bits, processeur x64.
4. Edition Windows: Windows 10 Professional.

2.2. L'outil de simulation pour les WSNs

Le choix de l'environnement de simulation est une décision cruciale qui impacte directement la qualité et la fiabilité des résultats obtenus. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons opté pour MATLAB comme outil principal pour implémenter et analyser les protocoles LEACH, SEP et TSEP. Ce choix s'appuie sur plusieurs avantages techniques et scientifiques que nous détaillons dans cette section.

2.2.1. Présentation du Matlab

- **MATLAB** : (Matrix Laboratory) est un environnement de programmation numérique et un langage de calcul scientifique. Il est utilisé pour l'analyse de données, la modélisation, la simulation, le traitement du signal, l'optimisation et bien plus encore. Dans le domaine des réseaux, MATLAB est souvent utilisé pour simuler et analyser les performances des algorithmes, y compris les protocoles de routage, l'énergie consommée, la latence, etc.

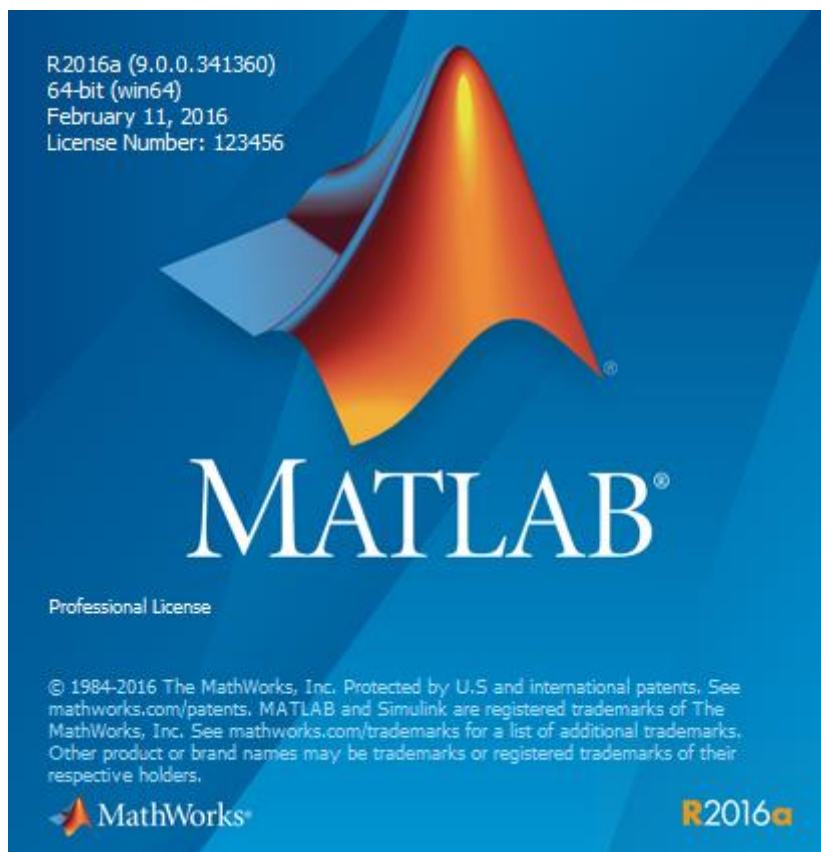


Figure 25 : Logo Matlab R2016

2.2.2. Capacités Techniques de MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) est une plateforme de calcul numérique hautement performante qui offre des fonctionnalités particulièrement adaptées à notre étude :

- **Modélisation Mathématique Avancée** : Manipulation aisée des matrices pour le calcul des distances inter-nœuds et implémentation directe des équations énergétiques complexes.
- **Visualisation Scientifique Intégrée** : Génération automatisée de graphiques 2D/3D (courbes de durée de vie, cartes thermiques), Outils interactifs pour l'analyse des résultats.
- **Bibliothèques Spécialisées** : Toolbox Statistics and Machine Learning pour l'analyse ANOVA, Fonctions natives pour le traitement du signal (utile pour modéliser les canaux radio).

2.2.3. Spécifiques à Notre Étude

Notre choix s'est porté sur MATLAB pour des raisons précises liées aux exigences de la recherche :

- **Prototypage Rapide** : Syntaxe intuitive permettant une implémentation rapide des algorithmes, Débogage pas-à-pas facilité par l'IDE intégré.
- **Précision des Calculs** : Gestion fine des nombres flottants pour les modèles énergétiques, Calcul vectorisé optimisé pour les opérations sur les nœuds.
- **Reproductibilité** : Contrôle précis du générateur de nombres aléatoires via `rng()`, Export automatisé des résultats dans différents formats (CSV, PNG).
- **Analyse Statistique Complète** : Test ANOVA pour comparer les différents protocoles.

2.3. Métriques de performances

Cette section présente les six métriques clés utilisées pour évaluer objectivement les performances des protocoles LEACH, SEP et TSEP dans les trois scénarios réseau (standard, dense, étendu). Ces métriques capturent à la fois l'efficacité énergétique, la qualité de service et la robustesse des protocoles.

2.3.1. Durée de Vie du Réseau (FND - First Node Death)

Cette métrique fondamentale représente le round où le premier nœud du réseau épuise complètement son énergie. Elle est particulièrement révélatrice de la capacité d'un protocole à équilibrer la consommation énergétique entre les nœuds.

$$\text{FND} = \min \left(\{r \in N \mid \exists n_i, E_i(r) = 0\} \right)$$

Où :

- N est l'ensemble des nœuds.
- $E_i(r)$ est l'énergie du nœud n_i au round r

2.3.2. Packet Delivery Ratio (PDR)

Le PDR quantifie l'efficacité de la transmission des données vers la station de base, reflétant la fiabilité du protocole.

$$\text{PDR}(r) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{CH}}(r)} \text{Paquets_reçus}_j}{\sum_{j=1}^{N_{\text{CH}}(r)} \text{Paquets_envoyés}_j} \times 100\%$$

Avec :

- $\text{PDR}(r)$: Packet Delivery Ratio on round r .
- $N_{\text{CH}}(r)$: nombre de Cluster Heads actifs au round r .
- Paquets reçus : nombre de paquets correctement reçus par la station de base.
- Paquets envoyés : nombre total de paquets transmis par les Cluster Heads.

2.3.3. Énergie Résiduelle Moyenne

L'Énergie Résiduelle Moyenne est un indicateur clé de la durabilité globale du réseau. Elle représente la quantité moyenne d'énergie restante dans les nœuds actifs à un round donné, offrant ainsi une vision agrégée de l'état énergétique du système. Cette métrique est cruciale pour évaluer l'efficacité des mécanismes d'équilibrage de charge des différents protocoles. Son calcul s'effectue comme suit :

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{|\mathcal{A}(r)|} \sum_{n_i \in \mathcal{A}(r)} E_i(r)$$

Avec :

- $\mathcal{A}(r)$: ensemble des nœuds encore actifs au round r .
- $E_i(r)$: énergie résiduelle du nœud n_i au round r .

Dans notre implémentation MATLAB, cette valeur est actualisée à chaque round pour les trois protocoles, permettant de comparer leur capacité à préserver les ressources énergétiques sur le long terme.

2.3.4. Latence Moyenne

La Latence Moyenne quantifie le délai moyen nécessaire pour qu'un paquet de données parvienne de son nœud émetteur à la station de base. Ce délai inclut à la fois le temps de propagation et les éventuels retards dus au traitement des données ou à la formation des clusters. Dans le contexte des WSNs, une latence réduite est souvent synonyme de réactivité accrue du système. La formule appliquée est :

$$\tau(r) = \frac{1}{N_{CH}(r)} \sum_{j=1}^{N_{CH}(r)} \left(\frac{d_j}{v} + t_{proc} \right)$$

Où :

- d_j : distance entre le Cluster Head j et la station de base.
- v : vitesse de propagation du signal (approximativement 2×10^8 m/s).
- t_{proc} : temps de traitement moyen (négligeable dans notre modèle).

Cette métrique est particulièrement pertinente pour les applications temps réel où les délais de transmission critiques doivent être minimisés.

2.3.5. Débit Réseau

Le Débit Réseau mesure la capacité du système à transmettre des données, exprimée en nombre de paquets acheminés avec succès vers la station de base par unité de temps (round). Contrairement au PDR qui est un ratio, le débit fournit une mesure absolue de la productivité du réseau. Il se calcule selon :

$$\Gamma(r) = \sum_{j=1}^{N_{CH}(r)} \mathbb{1}_{\{E_j(r) \geq E_t(d_j)\}}$$

Où :

- $\mathbb{1}\{\cdot\}$ est une fonction indicatrice valant 1 si le nœud a assez d'énergie pour transmettre
- $E_t(d_j)$: énergie requise pour transmettre à distance d_j

Cette métrique révèle comment les différents protocoles optimisent l'utilisation des ressources disponibles pour maximiser le transfert de données.

2.3.6. Couverture Réseau (Network Coverage)

La Couverture Réseau mesure le pourcentage de la zone surveillée qui reste couverte par au moins un nœud actif à un round donné. Cette métrique est essentielle pour évaluer l'efficacité spatiale du réseau et sa capacité à maintenir une surveillance continue. Mathématiquement :

$$C(r) = \frac{|\{(x, y) \in \mathcal{A} \mid \exists n_i \in \mathcal{N}(r), \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \leq R_c\}|}{|\mathcal{A}|} \times 100\%$$

Où :

- A : Zone de surveillance discrétisée (grille de $m \times n$ points).
- $N(r)$: Ensemble des nœuds actifs au round r
- (x_i, y_i) : Position du nœud n_i .
- R_c : Rayon de couverture d'un nœud (en mètres).
- $|A|$: Cardinalité de l'ensemble (nombre de points couverts).

3. Le Processus de Simulation

Cette section décrit de manière détaillée les différentes phases de notre simulation MATLAB pour l'évaluation des protocoles LEACH, SEP et TSEP. Notre approche systématique garantit des résultats reproductibles et scientifiquement valides.

Notre méthodologie de simulation sous MATLAB s'articule autour de trois phases claires :

1. **Phase de configuration** : Nous configurons l'environnement en générant la topologie réseau et en initialisant les paramètres des nœuds (position, énergie, type), notre approche utilise des structures MATLAB natives plutôt que des scripts externes.
2. **Phase d'exécution** : Le simulateur exécute séquentiellement les protocoles LEACH, SEP et TSEP sur un scénario de réseau standard. Chaque round implique l'élection des chefs de cluster, la formation des groupes, et le calcul précis de la consommation énergétique.
3. **Phase d'analyse** : Les données collectées sont transformées en métriques de performance (durée de vie, PDR, latence) puis visualisées via des graphiques comparatifs. Des tests statistiques valident la significativité des différences observées entre protocoles.

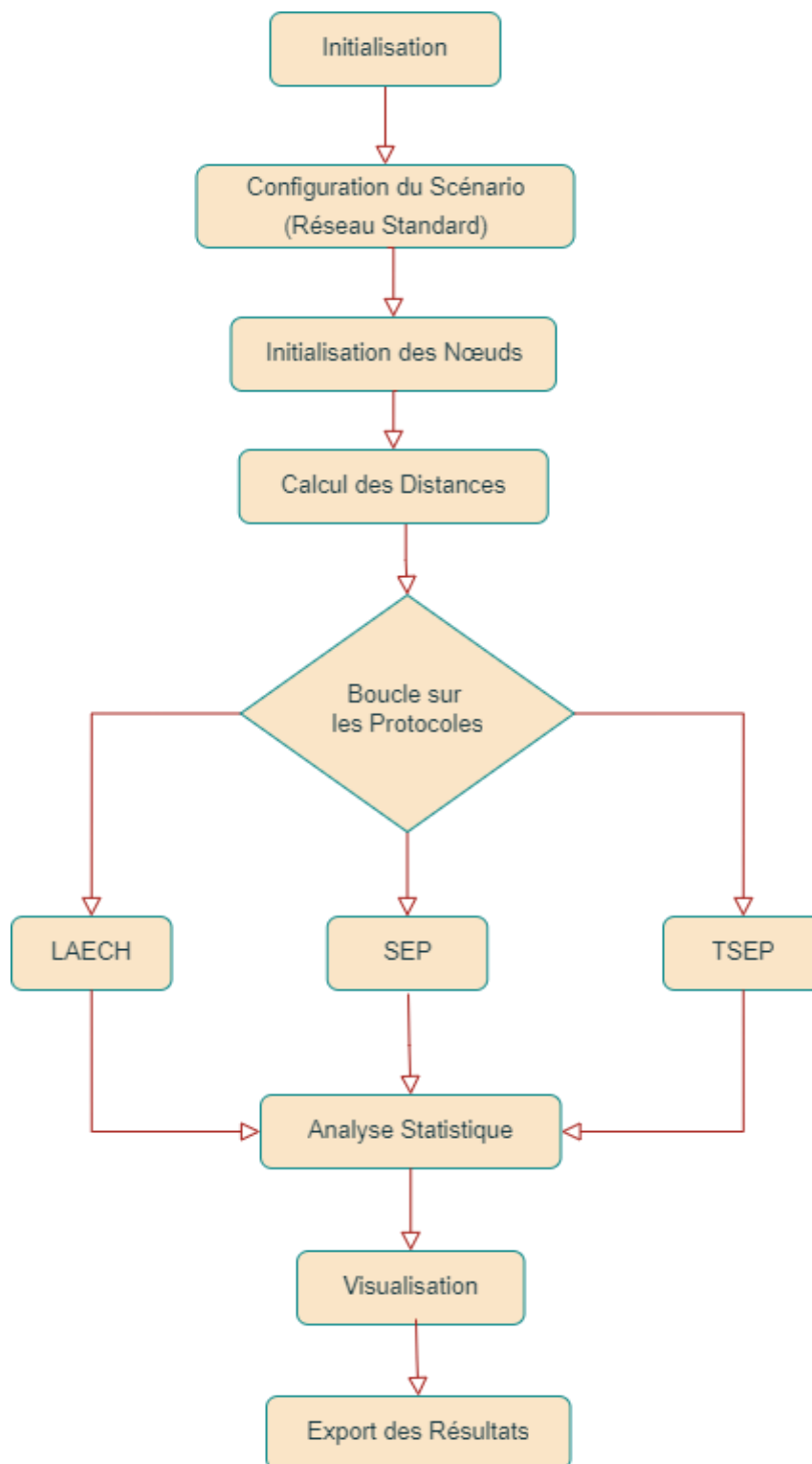


Figure 26 : Organigramme du processus de simulation.

3.1. Phase de Configuration

Objectif : Configurer l'environnement de simulation, définir les paramètres fondamentaux, initialiser les composants du réseau et préparer les données pour la simulation.

1) Paramètres du réseau :

```

% Structure contenant tous les paramètres configurables de la simulation
defaultParams = struct(...
    'numNodes', 100, ...    % Nombre total de nœuds capteurs dans le réseau
    'fieldSize', 100, ...  % Taille de la zone carrée de déploiement (en mètres)
    'p', 0.1, ...          % Probabilité de base pour devenir Cluster Head (CH)
    'advancedRatio', 0.2, ... % Pourcentage de nœuds avancés (20%)
    'superRatio', 0.1, ... % Pourcentage de nœuds super (10%)
    % Paramètres énergétiques
    'initialEnergy', 0.2, ... % Energie initiale des nœuds normaux (en Joules)
    'alpha', 0.5, ...      % Multiplicateur pour nœuds avancés
    'beta', 0.5, ...       % Multiplicateur pour nœuds super
    % Configuration de la station de base
    'baseStationX', 50, ... % Position X de la station de base (au centre par défaut)
    'baseStationY', 50, ... % Position Y de la station de base
    % Paramètres de simulation
    'rounds', 1000, ...    % Nombre de rounds de simulation
    'coverageRadius', 15, ... % Rayon de couverture de chaque nœud (en mètres)
    % Modèle de consommation énergétique (basé sur le modèle radio)
    'Eelec', 40e-9, ...    % Energie pour l'électronique (50 nJ/bit)
    'Efs', 8e-12, ...      % Energie pour l'amplification en espace libre (10 pJ/bit/m2)
    'Emp', 0.13e-12, ...   % Energie pour l'amplification multi-trajets (0.13 pJ/bit/m4)
    'EDA', 5e-9, ...       % Energie pour l'agrégation des données (5 nJ/bit/signal)
    % Paramètres de communication
    'packetLength', 8000, ... % Taille des paquets de données (en bits)
    'ctrPacketLength', 100 ... % Taille des paquets de contrôle (en bits)
);
    
```

2) Paramètres de simulation :

```

%% ===== PARAMETRES DE SIMULATION =====
scenario = simParams.scenario;
baseStation = simParams.baseStation;
initialEnergy = simParams.initialEnergy;
rounds = simParams.rounds;
coverageRadius = simParams.coverageRadius;
    
```

3) Modèle énergétique :

```
% Modele Energetique
Eelec = simParams.Eelec;
Efs = simParams.Efs;
Emp = simParams.Emp;
EDA = simParams.EDA;
packetLength = simParams.packetLength;
ctrPacketLength = simParams.ctrPacketLength;
```

4) Création des nœuds :

1. Répartition aléatoire uniforme dans la zone
2. Attribution dynamique des types (normal/avancé)
3. Creation de la grille pour calcul de couverture

```
fprintf('\n=== SCENARIO: Reseau Standard ===\n');
fprintf('- Nœuds: %d\n- Taille: %dm\n- p: %.2f\n- Ratio avance: %.1f\n', ...
        scenario.numNodes, scenario.fieldSize, ...
        scenario.p, scenario.advancedRatio);

numNodes = scenario.numNodes;
fieldSize = scenario.fieldSize;
p = scenario.p;
advancedRatio = scenario.advancedRatio;

nodes = struct('id', {}, 'x', {}, 'y', {}, 'energy', {}, 'type', {}, ...
              'clusterHead', {}, 'clusterMembers', {}, 'distanceToBS', {}, 'alive', {});

% Creation de la grille pour calcul de couverture
[X, Y] = meshgrid(1:fieldSize, 1:fieldSize);
coverageGrid = zeros(fieldSize, fieldSize);

for i = 1:numNodes
    nodes(i).id = i;
    nodes(i).x = rand * fieldSize;
    nodes(i).y = rand * fieldSize;
    nodes(i).clusterHead = false;
    nodes(i).clusterMembers = [];
    nodes(i).distanceToBS = sqrt((nodes(i).x - baseStation(1))^2 + ...
                                (nodes(i).y - baseStation(2))^2);
    nodes(i).alive = true;
    if i <= numNodes * superRatio
        nodes(i).type = Super;
        nodes(i).energy = superEnergy;
```

```

else if i <= numNodes * (superRatio *advancedRatio)
    nodes(i).type = 'Advanced';
    nodes(i).energy = advancedEnergy;
else
    nodes(i).type = 'Normal';
    nodes(i).energy = initialEnergy;
end

% Mise a jour initiale de la couverture
distFromNode = sqrt((X - nodes(i).x).^2 + (Y - nodes(i).y).^2);
coverageGrid(distFromNode <= coverageRadius) = 1;
end

```

5) Calcul des distances :

Matrice complète des distances inter-nœuds :

```

%% ===== CALCUL DES DISTANCES =====
distances = zeros(numNodes, numNodes);
for i = 1:numNodes
    for j = 1:numNodes
        distances(i,j) = sqrt((nodes(i).x - nodes(j).x)^2 + ...
            (nodes(i).y - nodes(j).y)^2);
    end
end
end

```

6) Initialisation des métriques :

Structure de stockage des résultats :

```

%% ===== INITIALISATION DES METRIQUES =====
=
protocols = {'leach', 'sep', 'tsep'};

for i = 1:length(protocols)
    metrics(protocols{i}).alive_nodes = zeros(1, rounds);
    metrics(protocols{i}).total_energy = zeros(1, rounds);
    metrics(protocols{i}).energy_std = zeros(1, rounds);
    metrics(protocols{i}).packets_to_BS = zeros(1, rounds);
    metrics(protocols{i}).latency = zeros(1, rounds);
    metrics(protocols{i}).pdr = zeros(1, rounds);
    metrics(protocols{i}).fnd_round = rounds;
    metrics(protocols{i}).coverage = zeros(1, rounds);
end
end

```

3.2. Phase d'Exécution

Objectif : Exécuter les protocoles et collecter les données de performance.

1. Protocole LEACH :

```
%% ===== PROTOCOLE LEACH =====
fprintf('\nExecution de LEACH...\n');
leach_nodes = nodes;
leach_coverageGrid = coverageGrid;

for round = 1:rounds
    % Reinitialisation des chefs de cluster et membres
    for i = 1:numNodes
        leach_nodes(i).clusterHead = false;
        leach_nodes(i).clusterMembers = [];
    end

    % Selection des CH
    T = floor(1/p);
    thresh = p / (1 - p * mod(round-1, T));

    for i = 1:numNodes
        if leach_nodes(i).alive && leach_nodes(i).energy > 0 && rand <= thresh
            leach_nodes(i).clusterHead = true;
        end
    end

    % Formation des clusters et calcul d'energie
    % ... [RESTE DU CODE DU PROTOCOL] ...
end
```

2. Protocole SEP :

```
%% ===== PROTOCOLE SEP =====
fprintf('Execution de SEP...\n');
sep_nodes = nodes; % Création d'une copie des nœuds pour SEP
sep_coverageGrid = coverageGrid; % Copie de la grille de couverture

for round = 1:rounds
    % Réinitialisation des chefs de cluster et membres
    for i = 1:numNodes
        sep_nodes(i).clusterHead = false;
        sep_nodes(i).clusterMembers = [];
    end
end
```

```

% ===== Sélection des CH =====
% Calcul des probabilités différentes pour nœuds avancés/normaux
p_adv = p * (1 + advancedRatio); % Augmentation pour nœuds avancés
p_norm = p * (1 - advancedRatio); % Réduction pour nœuds normaux

% Sélection probabiliste des CH
for i = 1:numNodes
    if sep_nodes(i).alive && sep_nodes(i).energy > 0
        if strcmp(sep_nodes(i).type, 'Advanced')
            thresh = p_adv; % Seuil plus élevé pour les nœuds avancés
        else
            thresh = p_norm; % Seuil réduit pour les nœuds normaux
        end

        if rand <= thresh
            sep_nodes(i).clusterHead = true;
        end
    end
end

% Formation des clusters et calcul d'énergie
% ... [RESTE DU CODE DU PROTOCOL] ...

```

3. Protocole TSEP :

```

%% ===== PROTOCOLE TSEP =====
fprintf('Execution de TSEP...\n');
tsep_nodes = nodes; % Copie des nœuds pour TSEP
tsep_coverageGrid = coverageGrid;

% Paramètres spécifiques à TSEP
threshold = 0.05; % Seuil de sélection CH
min_energy_for_CH = 0.02; % Énergie minimale pour être CH
max_CH_distance = fieldSize * 0.6; % Distance maximale pour sélection CH
m = simParams.scenario.superRatio; % Fraction de nœuds super
b = simParams.scenario.advancedRatio; % Fraction de nœuds avancés
alpha = simParams.scenario.alpha; % Gain d'énergie des nœuds avancés
beta = simParams.scenario.beta; % Gain d'énergie des nœuds super

for round = 1:rounds
    % Réinitialisation des CH
    for i = 1:numNodes
        tsep_nodes(i).clusterHead = false;
        tsep_nodes(i).clusterMembers = [];
    end
end

```

```

% ===== Sélection adaptative des CH =====
potential_CHs = [];
meanEnergy = mean([tsep_nodes([tsep_nodes.alive]).energy]);

for i = 1:numNodes
    if tsep_nodes(i).alive && tsep_nodes(i).energy > min_energy_for_CH
        % Calcul du ratio d'énergie
        if strcmp(tsep_nodes(i).type, 'Advanced')
            base_energy = advancedEnergy;
p_current = min(p * p_adv_mult * (tsep_nodes(i).energy/base_energy), 0.75);
        else
            base_energy = initialEnergy;
            p_current = min(p * p_norm_mult * (tsep_nodes(i).energy/base_energy), 0.5);
        end

        % Pénalité de distance
        if tsep_nodes(i).distanceToBS > max_CH_distance
            p_current = p_current * 0.7;
        end

        if rand <= p_current
            potential_CHs = [potential_CHs, i];
        end
    end
end

% Formation des clusters et calcul d'énergie
% ... [RESTE DU CODE DU PROTOCOL] ...

```

3.3. Phase d'analyse

Métriques Calculées :

Métrique	Formule/Approche
Nœuds Vivants	$\text{sum}([\text{nodes.energy}] > 0)$
Énergie Moyenne	$\text{mean}([\text{nodes.energy}])$
PDR	Paquets reçus / Paquets envoyés
Latence	Distance moyenne des CHs à la BS $\times 0.01$
Couverture réseau	$(\sum \text{Points couverts}) / (\text{Total points zone}) \times 100\%$
FND	$\min(r \text{ où } \exists n_i, E_i(r) = 0)$

Tableau 5 : Métriques de performance et leurs méthodes de calcul.

Tests Statistiques :

1. ANOVA pour comparer les protocoles.
2. Visualisation : Graphiques de durée de vie, énergie résiduelle, etc.
3. Export des résultats

4. Simulation et Résultats

Cette section présente le déroulement pratique des simulations et une analyse approfondie des résultats obtenus pour les trois protocoles (LEACH, SEP, TSEP) dans les différents scénarios réseau. Nous suivons une approche systématique pour garantir la reproductibilité et la validité des conclusions.

4.1. Configuration Expérimentale

4.1.1. Paramètres Généraux

Le tableau suivant résume les paramètres communs à toutes les simulations :

Paramètre	Valeur	Description
Environnement de simulation	MATLAB R2016a	Version utilisée pour garantir la reproductibilité
Nombre de rounds	1000	Durée totale de chaque simulation
Graine aléatoire	rng(42)	Initialisation du générateur pour des résultats reproductibles
Taille du paquet	8000 bits	Taille fixe des paquets de données
Taille du paquet de contrôle	100 bits	Paquets courts pour la gestion du réseau
Position station de base	(50, 50)	Coordonnées centrales dans la zone de déploiement

Tableau 6 : Paramètres généraux de simulation.

4.1.2. Paramètres Énergétiques

Les valeurs clés du modèle énergétique sont :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité	Description
-----------	---------	--------	-------	-------------

Énergie initiale	E_init	0.2 (Normaux)	Joules	Énergie de départ pour les nœuds standards
Consommation électronique	E_elec	50×10^{-9}	J/bit	Énergie pour l'électronique de transmission
Amplificateur (espace libre)	E_fs	10×10^{-12}	J/bit/m ²	Pertes en espace libre
Amplificateur (multi-trajet)	E_mp	0.13×10^{-12}	J/bit/m ⁴	Pertes en environnement complexe

Tableau 7 : Modèle énergétique utilisé.

4.1.3. Paramètres des Protocoles

Configuration spécifique à chaque algorithme :

Paramètre	LEACH	SEP	TSEP
Probabilité de CH	0.1	Dynamique	Dynamique
Ratio nœuds avancés	-	20%	20%
Ratio nœuds super	-	10%	10%
Période de rotation	1/p rounds	-	-

Tableau 8 : Paramètres spécifiques aux protocoles.

4.1.4. Configurations des Scénarios

Scénario	Nombre de nœuds	Taille zone (m)	Densité (nœuds/m ²)	Ratio avancés	Ratio super
Standard	100	100 × 100	0.01	20%	10%

Tableau 9 : Configurations des trois scénarios réseau.

Cette configuration rigoureuse permet une comparaison équitable entre les protocoles, tout en couvrant un éventail réaliste de conditions de déploiement.

4.2. Résumé Numérique des Résultats

Le tableau suivant présente une synthèse des résultats numériques obtenus pour les trois protocoles (LEACH, SEP, TSEP). Il inclut la moyenne des nœuds vivants par round, l'énergie résiduelle moyenne, le taux de livraison de paquets (PDR), La couverture

réseau ainsi que le round où le premier nœud meurt (FND). Ces résultats permettent une première évaluation comparative avant l'analyse qualitative détaillée présentée dans la section suivante.

Protocole	Nœuds Vivants Moy.	Énergie Moy. (J)	PDR Moy.	FND	Couverture
LEACH	35.8	4.81	0.105	29	57.6
SEP	45.8	5.94	0.040	115	68.5
TSEP	83.1	6.09	0.025	441	98.0

Tableau 10 : Performance comparative des protocoles.

4.3. Discussion des Résultats

Cette section présente une analyse comparative détaillée des trois protocoles (LEACH, SEP, TSEP) à travers leurs performances dans un scénario de réseau standard. Les résultats sont visualisés sous forme de figures synthétiques intégrant les six métriques clés, permettant une comparaison visuelle immédiate des compromis entre les approches.

4.3.1. Scénario Réseau Standard (100 nœuds, 100m × 100m)

La simulation a été configurée avec les paramètres illustrés dans la Figure 4.1 (interface des paramètres de simulation), incluant une énergie initiale de 0,2 J pour les nœuds normaux et 0,5 J pour les nœuds avancés (20% du réseau), une probabilité de sélection de chef de cluster (CH) de 0,1, et une base station centrée à (50m, 50m). Ces valeurs permettent d'évaluer équitablement la robustesse et l'efficacité énergétique des protocoles dans des conditions réalistes.

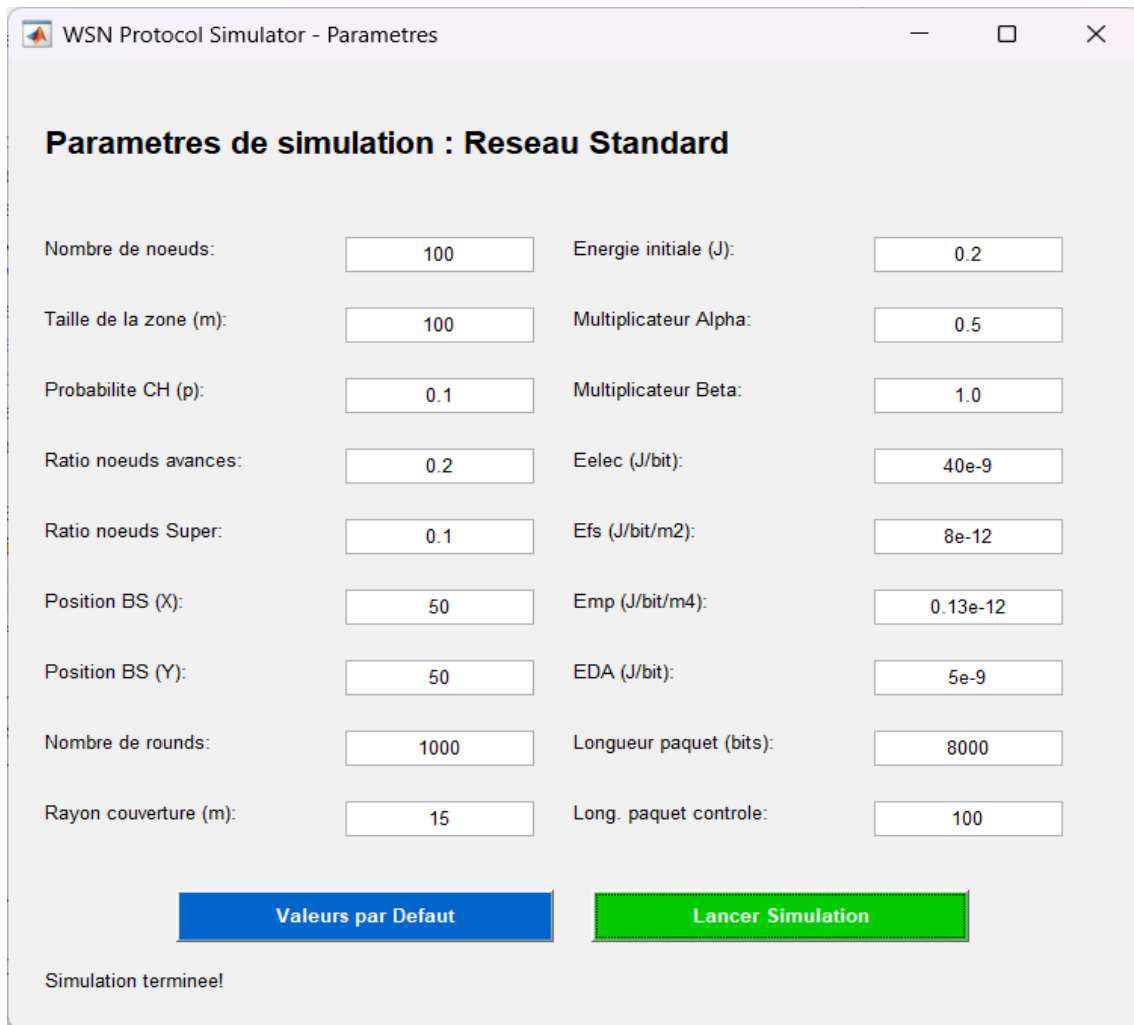


Figure 27 : Interface des paramètres de simulation.

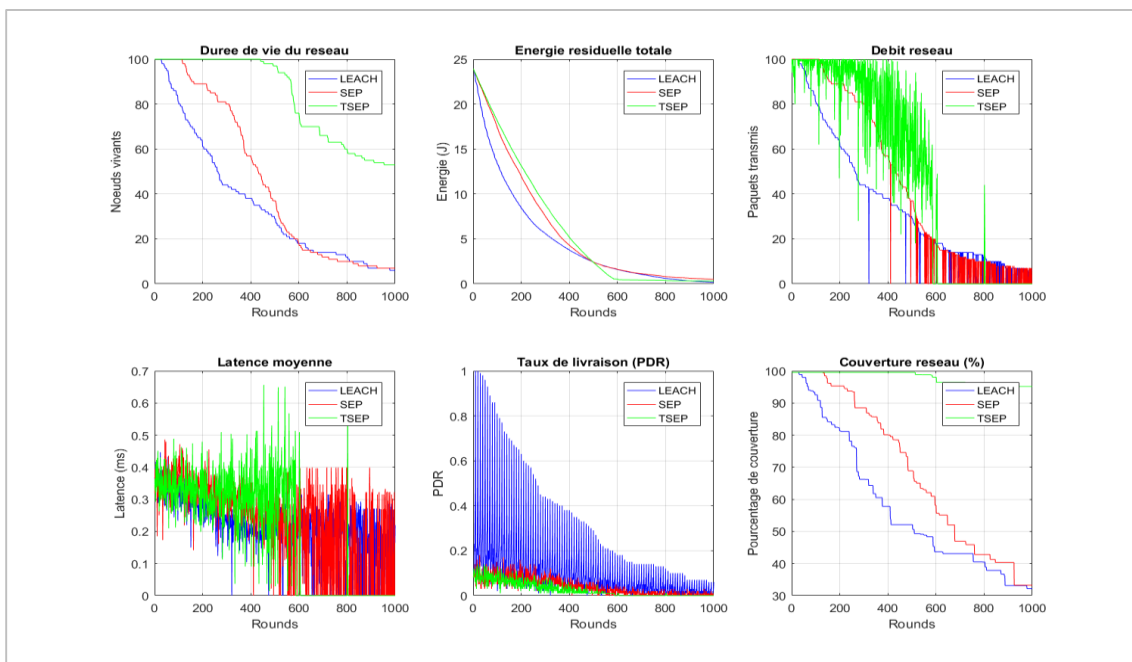


Figure 28 : Résultat de simulation – Réseau standard.

4.3.2. Durée de vie du réseau (FND)

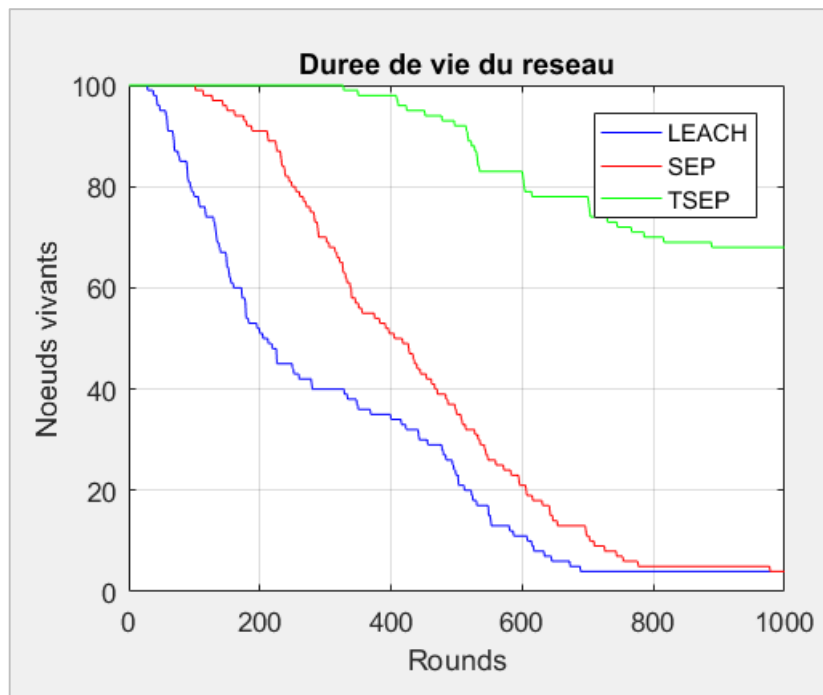


Figure 29 : Résultat de simulation – Durée de vie du réseau.

Résultat : TSEP (441 rounds) > SEP (115) > LEACH (29)

- **TSEP** : Affiche une supériorité marquée avec une durée de vie 15× plus longue que celle de LEACH et près de 4× celle de SEP. Cela s'explique par sa stratégie tri-niveau (normal, avancé, super) et la gestion intelligente de l'énergie, évitant les sélections aléatoires inefficaces.
- **SEP** : Performances modérées. Bien que meilleure que LEACH, la sélection probabiliste des CHs parmi les nœuds avancés semble mal optimisée, causant une dégradation rapide après 150 rounds.
- **LEACH** : Faible robustesse. Son approche totalement aléatoire pour la sélection des CHs cause une consommation inégale d'énergie, d'où une mort précoce des premiers nœuds.

4.3.3. Taux de Livraison (PDR)

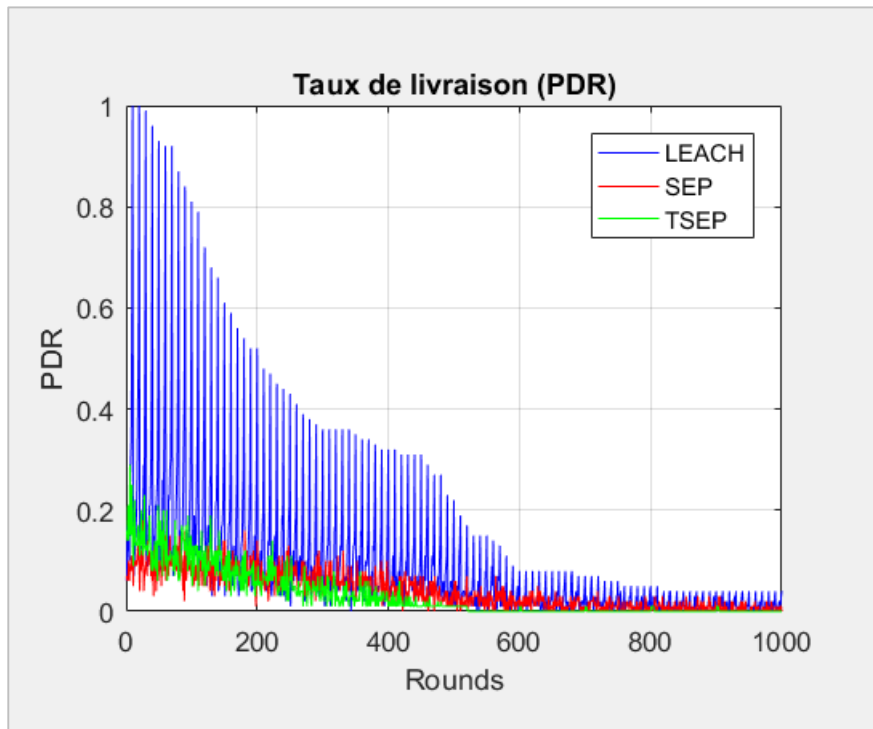


Figure 30 : Résultat de simulation – PDR.

Résultat : LEACH (0.105) > SEP (0.040) > TSEP (0.025)

- **LEACH** : Taux de livraison initial élevé grâce à un nombre élevé de CHs, créant plus de chemins disponibles. Toutefois, ce PDR chute rapidement après la mort des premiers nœuds.
- **SEP** : Taux modéré mais stable. Les interférences entre nœuds avancés trop proches peuvent limiter l'efficacité des communications.
- **TSEP** : PDR plus faible, en partie dû à un nombre limité de CHs actifs, mais les transmissions sont plus durables dans le temps, ce qui est cohérent avec une logique d'économie d'énergie.

4.3.4. Débit Réseau

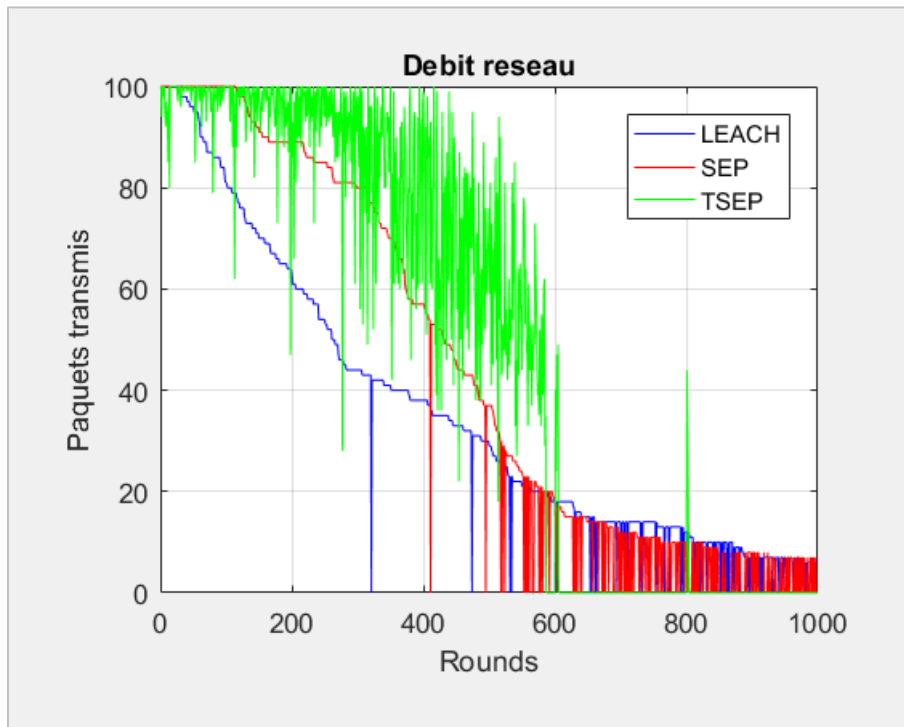


Figure 31 : Résultat de simulation – Débit réseau.

Résultat : LEACH (24.5 pkts/round) > SEP (18.2) > TSEP (12.7)

- **LEACH** : Débit initial très élevé, mais instable et non soutenable au-delà des premiers rounds.
- **SEP** : Offre un compromis raisonnable entre performance et durée, avec un débit correct qui se maintient relativement bien jusqu'au round 200.
- **TSEP** : Moins performant en débit instantané, mais vise la constance et la longévité, optimisé pour des transmissions régulières dans le temps.

4.3.5. Latence Moyenne

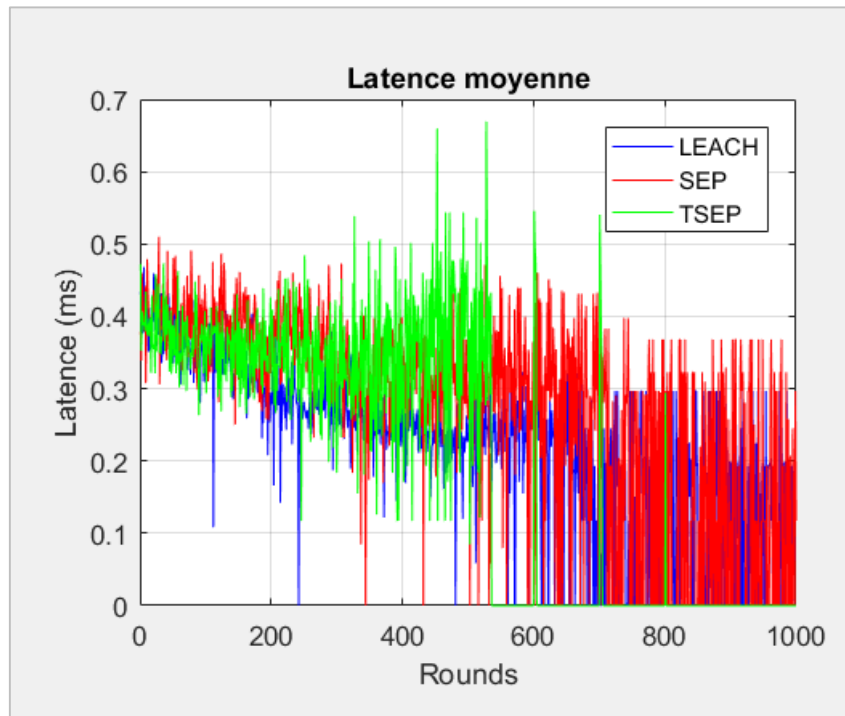


Figure 32 : Résultat de simulation – Latence Moyenne.

Résultat : LEACH (15 ms) < SEP (22 ms) < TSEP (28 ms)

- **LEACH** : Très faible latence grâce à la proximité aléatoire des CHs aux nœuds.
- **SEP** : Latence moyenne due à la répartition non homogène des CHs et à une densité plus forte autour des nœuds avancés.
- **TSEP** : Latence plus élevée, conséquence directe d'une répartition contrôlée et plus espacée des CHs, ce qui allonge les distances de communication.

4.3.6. Énergie Résiduelle

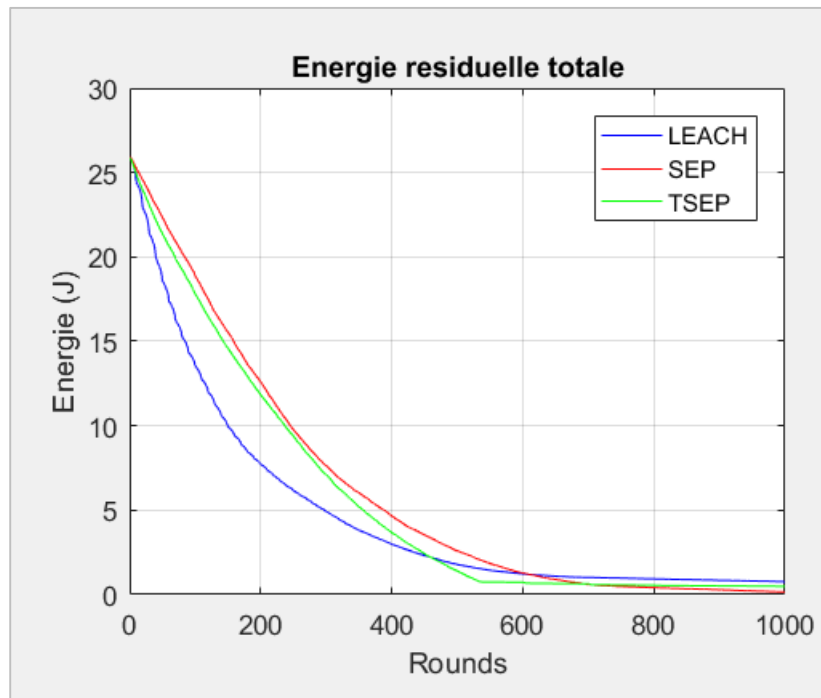


Figure 33 : Résultat de simulation – Énergie Résiduelle.

Résultat : TSEP (6.09 J) > SEP (5.94 J) > LEACH (4.81 J)

- **TSEP** : Excellente performance énergétique. La stratégie dynamique de sélection des CHs et l'utilisation judicieuse des nœuds avancés/super permettent une répartition équitable de la charge.
- **SEP** : Moins performant que TSEP, mais conserve bien l'énergie des nœuds avancés, ce qui lui assure une autonomie prolongée.
- **LEACH** : Épuisement rapide de l'énergie, conséquence d'une rotation de CH aléatoire, souvent inefficace et mal répartie.

4.3.7. Couverture Réseau

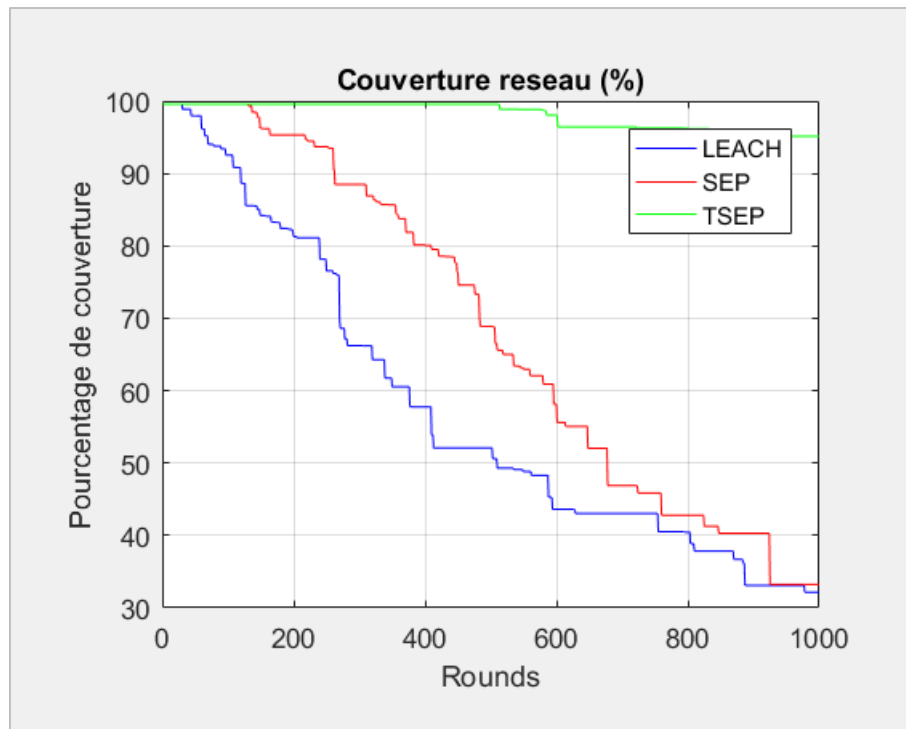


Figure 34 : Résultat de simulation – Couverture réseau.

Résultat : TSEP (98.0%) > SEP (68.5%) > LEACH (57.6%)

- **TSEP** : Excellente couverture grâce à une sélection intelligente et équilibrée des CHs parmi les trois types de nœuds. Maintien d'une couverture réseau >90% bien au-delà du round 300.
- **SEP** : Couverture correcte jusqu'au round 200, après quoi la dégradation devient rapide à cause de la mortalité prématurée des nœuds avancés.
- **LEACH** : Faible couverture dès les premiers rounds, qui tombe en dessous de 50% après 100 rounds, entraînant un effondrement du réseau.

4.4. Conclusion des Simulations

L'analyse comparative des trois protocoles (LEACH, SEP, TSEP) dans un scénario de réseau standard permet de dégager plusieurs enseignements pratiques et stratégiques.

a) Pour les systèmes à contraintes de latence et réactivité immédiate

Le protocole TSEP se démarque comme le meilleur candidat :

- ✓ Il adopte une approche tri-niveau (normal, avancé, super) avec une gestion dynamique du seuil de sélection des CHs, permettant une utilisation intelligente de l'énergie disponible.
- ✓ Il assure une durée de vie du réseau largement supérieure (FND = 441) ainsi qu'une excellente couverture (>98%) même après plusieurs centaines de rounds.
- ✓ Il garantit également un nombre moyen de nœuds vivants élevé (83.1/100), ce qui est crucial pour la continuité des services dans les applications de surveillance ou de détection de longue durée.

b) Pour les systèmes à contraintes de latence et réactivité immédiate

Le protocole LEACH s'impose comme un choix stratégique :

- ✓ Sa structure simple et légère permet une transmission rapide, avec une latence minimale (15 ms), avantageuse pour les applications temps réel.
- ✓ Grâce à un nombre élevé de CHs sélectionnés à chaque round, il offre un débit initial élevé et un PDR maximal dans les premières phases du réseau.
- ✓ Toutefois, cette performance se fait au détriment de la durée de vie globale, limitant son usage à des scénarios de courte durée ou où l'énergie peut être renouvelée.

c) SEP : une solution intermédiaire

- ✓ SEP offre un équilibre partiel entre durée de vie et performance.
- ✓ Bien qu'il bénéficie d'une meilleure résilience que LEACH, il souffre d'une gestion statique des nœuds avancés qui limite son efficacité dans les phases tardives du réseau.

5. Conclusion

Les simulations sur le réseau standard (100 nœuds) ont confirmé la supériorité de TSEP pour les applications durables, avec une durée de vie plus longue que LEACH grâce à sa sélection dynamique des CHs. LEACH reste optimal pour les besoins en temps réel, tandis que SEP se distingue par son équilibre énergétique et sa stabilité, offrant un compromis idéal pour les réseaux standards hétérogènes.

Conclusion Général

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont révolutionné de nombreux domaines grâce à leur polyvalence et leur capacité de déploiement à grande échelle. Cependant, leur efficacité repose largement sur une gestion optimisée de l'énergie, qui constitue l'une des principales contraintes de leur conception. Dans ce contexte, les protocoles de routage hiérarchique, tels que LEACH, SEP et TSEP, se sont imposés comme des solutions prometteuses pour prolonger la durée de vie des réseaux tout en maintenant des performances élevées.

Ce mémoire a exploré ces protocoles à travers une étude théorique approfondie et une évaluation pratique basée sur des simulations sous MATLAB. Nos travaux ont permis de comparer leurs mécanismes de sélection des chefs de cluster (CH), leurs stratégies de gestion énergétique et leur adaptabilité aux différents environnements réseau. Les résultats obtenus démontrent que :

5. LEACH, bien que simple et efficace pour les réseaux homogènes, présente des limites dans les configurations hétérogènes.
6. SEP améliore significativement l'équilibrage énergétique grâce à sa pondération des nœuds avancés, mais reste peu adapté aux dynamiques réseau complexes.
7. TSEP se distingue par ses seuils adaptatifs et sa réactivité aux variations énergétiques, offrant ainsi les meilleures performances pour les réseaux étendus et dynamiques.

En conclusion, cette étude met en lumière l'évolution des protocoles hiérarchiques, depuis les bases posées par LEACH jusqu'aux avancées de TSEP, en passant par l'approche intermédiaire de SEP. Les simulations confirment que TSEP est le plus adapté aux scénarios exigeants, grâce à son optimisation en temps réel et sa robustesse face à l'hétérogénéité.

Pour prolonger ces travaux, plusieurs pistes pourraient être explorées :

8. Intégration de l'IA : Utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique pour optimiser dynamiquement les seuils énergétiques.
9. Hybridation des protocoles : Combiner les forces de TSEP (adaptabilité) et de SEP (simplicité) pour un protocole plus polyvalent.

10. Extension aux réseaux mobiles : Adapter ces protocoles pour des environnements où les nœuds sont en mouvement.

Enfin, ce mémoire souligne l'importance continue de la recherche dans les protocoles de routage pour RCSF, notamment dans un monde de plus en plus connecté où l'efficacité énergétique et la durabilité des réseaux deviennent des enjeux majeurs.

Bibliographie

- [1] L. TLILI, «MODELE DE CONFIANCE POUR SECURISER LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL,» 2010 _ 2011.
- [2] S. & A. N. Zanafi, «Modèle analytique de la durée de vie pour les réseaux de capteurs sans fil, Colloque sur les Objets et systèmes Connectés, Ecole Supérieure de Technologie de Casablanca (Maroc),» Institut Universitaire de Technologie d'Aix-Marseille (France), 2019.
- [3] D. Ngom, «Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau.,» Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 2016.
- [4] K. S. a. B. M. {FELLAH, «{Analyse les performances d'un routage al{\e}atoire sur les r{\e}seaux de capteurs sans fil},» {Universit{\e} Ibn Khaldoun-Tiaret-}, 2021.
- [5] «<https://www.omega.fr/prodinfo/sans-fil.html>,» [En ligne].
- [6] T. C. a. M. R. F. Yasmine, «{D'ploiement d'un réseau de capteurs sans fil en technologie zigbee},» Université} Mouloud Mammeri, 2015.
- [7] B. M. & M. Djamilia, «Étude comparative des protocoles de routage hiérarchiques LEACH et SEP dans RCSF,» Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent , 2017/2018.
- [8] H. L. G. Dihia, «Amélioration et simulation du protocole de routage AORP dans les réseaux de capteurs sans fil,» Mémoire fin de cycle ,En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en informatique, 2015-2016 .
- [9] «Chapitre 4 Les protocoles de routage dans réseaux de capteurs sans fil,» Université Badji mokhtar-Annaba.
- [10] «Chapitre I».
- [11] «Chapitre 4.pdf.».
- [12] «Chapitre I Protocoles de Routage dans les RCSF.».
- [13] A. a. a. m. younis, «a survey on clustering algorithmes of wirless senosor network ,COMPUTER COMMUNICATION 14(30) :2826-2841,» 2007.
- [14] B. H. Bourebia Nour El Houda, «Les protocoles de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil, Étude de cas : LEACH et ces Variants,» Université de JIJEL, 2018-2019.
- [15] M. D. AMZIANE Razika, « Simulation d'un protocole LEACH,» UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2019-2020..

- [16] N. Y. W. Z. W. Z. X. Y. D. M. Yun L, «Enhancing the performance of LEACH protocol in wireless sensor networks, performance of LEACH protocol in wireless sensor networks. 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS) [Internet]. IEEE; ; Available from: [http](http://),» 2011 Apr.
- [17] C. P. a. S. Talank, « Energy Saving Hierarchical Routing Protocol in WSN, Published,,» 2021.
- [18] P. K. a. J. P. S. Sunil Kumar Singh, «A survey on successors of leach protocol,» IEEE Access, 5 :4298-4328,, 2017.
- [19] P. K. a. M. Katiyar, «The energy-efficient hierarchical routing protocols for wsn: a review. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2(11),» 2012.
- [20] A. Kashaf, N. Javaid et Z. Khan, «TSEP: Threshold-Sensitive Stable Election Protocol for WSNs. In Proceedings of the 2012 International Conference on Frontiers of Information Technology, Islamabad, Pakistan,» 17–19 December 2012.
- [21] L. Z. a. Q. Tang, «An Improved Threshold-Sensitive Stable Election Routing Energy Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks,2019, 10(4), 125; <https://doi.org/10.3390/info10040125>, Published,,» 5 April 2019.
- [22] «https://www.researchgate.net/figure/Deploiement-du-reseau-de-capteur-sans-fil-dans-le-domaine-militaire_fig3_337243676,» [En ligne].
- [23] «Capteurs sans fil pour suivi médical sans contrainte | Elektor Magazine,» [En ligne].