

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 20 août 1955—Skikda
Département d'informatique



Étude et Mise en Œuvre des Protocoles de Routage SEP, SEP-PSO et SEP-BPSO dans les Réseaux de Capteurs sans Fil

Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de master en informatique
Spécialité : systèmes informatiques

Préparé par :

M^{lle} Boudjema Meriem

M^{lle} Louracia Amina

Présenté devant le jury :

M Mawloud Mosbah	Maître de conférences 'A'	Président
M. Walid Laouar	Maître-assistant 'A'	Examineur
M. Mohammed Redjimi	Professeur	Encadrant

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.. Tout d'abord, un immense merci à mon professeur, Redjimi Mohammed, pour avoir accepté de m'encadrer et pour ses conseils précieux, son accompagnement et sa disponibilité.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire

Je souhaite également remercier ma famille et mes amis pour leur soutien moral et leur encouragement constant, qui m'ont permis de surmonter les difficultés rencontrées

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, par leurs suggestions, leur aide ou simplement leur présence, ont participé à l'aboutissement de ce projet

Boudjema Meriem

Merci



Dédicaces

Je dédie ce travail

A mon père, que je le remercie énormément pour ces efforts, ses conseils et sa surveillance,

A ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite,

Pour tous leurs sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour toute leur assistance et leur présence dans ma vie.

À mon cher frère,

Seif Ali Tu as toujours été mon pilier, mon confident et mon plus grand soutien, cette réussite, je te la dédie du fond du cœur.

A toutes mes amies,

Mes chères Oumaima, Ilhem et Meram merci d'avoir été à mes côtés tout au long de ce parcours, pour vos encouragements, votre soutien et votre écoute précieuse.

*À tous les étudiants de Palestine,
qui poursuivent leur quête de savoir malgré les
épreuves,
qui incarnent le courage, la persévérance et l'espoir.
Que votre détermination inspire le monde entier.
Cette modeste contribution vous est dédiée,
en hommage à votre résilience et à votre amour
inébranlable pour l'éducation.*

Boudjema Meriem

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon professeur, Redjimi Mohammed, pour avoir accepté de m'encadrer et pour son soutien et ses conseils qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

Un grand merci à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

Nous nous souvenons également avec mille remerciements et gratitude de tous les membres de ma famille pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien tout au long de ce long voyage, en particulier de ma mère.

Sans oublier mes remerciements particuliers à mes amis pour leur soutien, qu'il soit direct ou indirect.

Amína Louracia

Merci



Dédicaces

À mon père qui m'a quitté

À ma mère qui était à mes côtés

*Mon père, qui m'aimait et souhaitait me voir réussir
C'était une longue période d'étude mais j'ai atteint
l'objectif*

*Ainsi, je dédie ma réussite, ma reconnaissance et mon
amour inébranlable à mes parents pour leurs sacrifices.
Je te resterai à jamais reconnaissant*

À mon cher frère

*Samí qui m'a soutenu tout au long de mon parcours
académique.*

À mes chères sœurs

*Nesrine et Aya ont été d'un grand soutien pour moi,
m'aidant à surmonter toutes les épreuves de la vie avec
leurs précieux conseils.*

*Madjeda, la femme de mon frère et à son beau-fils,
ousayd*

A toutes mes amies

*A mon amie proche « aya » qui a été toujours
présente à moi*

*A tous mes amis Rania Amel Nada Yasmina pour leur
soutien*

Amina Houracia

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) constituent une technologie clé pour la surveillance, la collecte et la transmission de données dans des environnements variés grâce à leur déploiement flexible et leur capacité d'auto-organisation. Leur adoption croissante dans des applications critiques (environnement, santé, industrie, sécurité) s'explique par leur simplicité de mise en œuvre et leur potentiel d'innovation. Cependant, ces réseaux font face à des défis majeurs, notamment la gestion de l'énergie, la sécurité, la mobilité imprévisible des nœuds, l'agrégation des données et la conception de protocoles de routage efficaces. L'autonomie énergétique, en particulier, demeure un enjeu central, car la durée de vie du réseau dépend fortement de l'optimisation de la consommation des nœuds, souvent déployés dans des zones hostiles ou difficilement accessibles.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à l'optimisation du routage pour améliorer la durée de vie des RCSF. Nous étudions et comparons trois protocoles de routage : PSO (Particle Swarm Optimization), BPSO (Binary Particle Swarm Optimization) et SEP (Stable Election Protocol). PSO et BPSO sont des méta-heuristiques inspirées du comportement collectif, permettant une sélection optimisée des chefs de clusters, tandis que SEP est un protocole hiérarchique conçu pour les réseaux hétérogènes. L'objectif est d'analyser leur impact sur la consommation énergétique, la stabilité du réseau et l'efficacité de la transmission des données.

Pour cela, nous avons implémenté ces protocoles sous MATLAB et mené une série de simulations comparatives. Les résultats montrent que les approches basées sur les méta-heuristiques (PSO et BPSO) surpassent le protocole SEP en termes de gestion énergétique et de durée de vie du réseau, grâce à une meilleure répartition de la charge entre les nœuds et une sélection plus judicieuse des chefs de clusters. Le protocole BPSO, en particulier, s'avère adapté à la nature binaire de la sélection des chefs, offrant ainsi une performance accrue.

Cette étude met en évidence l'importance de l'intégration d'algorithmes d'optimisation intelligents dans la conception des protocoles de routage pour les RCSF, ouvrant la voie à des réseaux plus robustes, autonomes et économes en énergie.

Mots clés: Réseaux de capteurs sans fil, Protocoles de routage, Optimisation par essaim de particules (PSO), Optimisation binaire par essaim de particules (BPSO),

Protocole SEP (Stable Election Protocol), Clustering, Chefs de cluster (Cluster Heads), Méta-heuristiques, Économie d'énergie, Durée de vie du réseau

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) are a key technology for monitoring, collecting, and transmitting data in diverse environments thanks to their flexible deployment and self-organizing capabilities. Their growing adoption in critical applications (environment, healthcare, industry, security) is due to their ease of implementation and potential for innovation. However, these networks face major challenges, including energy management, security, unpredictable node mobility, data aggregation, and the design of efficient routing protocols. Energy autonomy, in particular, remains a key issue, as network lifetime depends heavily on optimizing the power consumption of nodes, which are often deployed in hostile or hard-to-reach areas.

In this context, this thesis focuses on routing optimization to improve the lifetime of WSNs. We study and compare three routing protocols: Particle Swarm Optimization (PSO), Binary Particle Swarm Optimization (BPSO), and Stable Election Protocol (SEP). PSO and BPSO are metaheuristics inspired by collective behavior, enabling optimized cluster head selection, while SEP is a hierarchical protocol designed for heterogeneous networks. The objective is to analyze their impact on energy consumption, network stability, and data transmission efficiency.

To this end, we implemented these protocols in MATLAB and conducted a series of comparative simulations. The results show that the metaheuristic-based approaches (PSO and BPSO) outperform the SEP protocol in terms of energy management and network lifetime, thanks to better load distribution among nodes and more judicious cluster head selection. The BPSO protocol, in particular, proves to be well-suited to the binary nature of leader selection, thus delivering improved performance.

This study highlights the importance of integrating intelligent optimization algorithms into the design of routing protocols for WSNs, paving the way for more robust, autonomous, and energy-efficient networks.

Keywords: Wireless sensor networks, Routing protocols, Particle swarm optimization (PSO), Binary particle swarm optimization (BPSO), Stable Election Protocol (SEP), Clustering, Cluster heads, Metaheuristics, Energy saving, Network lifetime.

Table de matière

Table des matières :

Introduction générale	1
Introduction générale	2
Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux capteur sans fil	4
1.1 Introduction	5
1.2 Réseau sans fil	5
1.2.1 Les catégories des réseaux sans fil	5
1.3. Capteur sans fil	6
1.3.1. Architecture d'un capteur sans fil	6
1. L'unité d'acquisition	6
2. L'unité de traitement	6
3. Un module de communication (Transceiver)	7
4. La batterie	7
1.4 Réseaux de Capteurs sans fil	7
1.4.1. Historique des Réseaux de capteurs sans fil	8
1.4.2. Caractéristiques des Réseaux de capteurs sans fil	9
1.5. Architecture d'un RCSF	11
1.5.1. Composants Principaux	11
1.5.2 Modèle en couches	12
1.5.3 Architecture réseau	13
1.5.4 Plan de gestion	13
1.6. Sécurité des RCSFs	13
1.6.1. Spécificités et Vulnérabilités	13
1.6.2. Types d'Attaques	14
1.6.3. Solutions de Sécurité	14
1.7. Applications des réseaux de capteurs sans fil	15
1.7.1 Surveillance environnementale	15
1.7.2. Santé et médecine	15

Table de matière

1.7.3. Agriculture et gestion des ressources	15
1.7.4. Sécurité et surveillance	16
1.7.5. Transports et logistique	16
1.7.6. Domotique et gestion énergétique	16
1.7.7. Applications militaires	16
1.8. Conclusion	17
Chapitre2 : Les protocoles de routages dans les réseaux de capteur sans fil.....	18
2.1 Introduction	19
2.2. Le routage	19
2.2.1. Définition.....	19
2.2.2 Caractéristiques de routage dans RCSF	19
2.3 Les protocoles de routage dans RCSF	19
2.3.1. Définition de la notion de protocole	19
2.4 Principaux critères pour le développement d'un protocole de routage.	20
2.5 Classification des protocoles de routage dans les RCSF.....	21
2.5.1 Classification selon la structure du réseau.....	22
A. Structure de réseau	22
A.1 Protocoles de routage à plat	22
A.2 Protocoles de routage hiérarchique	23
A.3 Les protocoles de routage géographique	24
B. Découverte de route (l'établissement de route)	25
B.1 Les protocoles réactifs	25
B.2 Les protocoles proactifs	25
B.3 Les protocoles hybrides	25
C. Paradigme de communication	26
C.1 Centré donnée	26
C.2 Localisation	26

Table de matière

C.3 Centre nœuds	26
D. Le fonctionnement du protocole	26
D.1 Basé-Négociation	26
D.2 Basé-Multi-chemins	26
D.3 Basé requête	27
D.4 Basé QOS	27
D.5 Basé cohérence	27
2.6 Les protocoles de routage proposé pour les RCSF	28
2.6.1 Protocoles de routage hiérarchiques	28
2.6.2 Protocoles de routage non hiérarchiques	29
2.7 Comparaison entre ces différents protocoles	30
2.8 Conclusion	31
Chapitre 3: la méta-heuristique PSO et le protocole SEP	32
3.1 Introduction	33
3.2 Notion de méta-heuristique	33
3.2.1 Définition	33
3.3 Protocole stable election ptotocole	33
3.3.1 Définition	33
3.3.2 Principe de protocole	34
3.3.3 Formalisation	34
3.3.4 Algorithme SEP	35
3.4 Algorithme Particale Swarm Optimization PSO.....	37
3.4.1 Origine	37
3.4.2 Principe de l'algorithme	37
3.4.3 Fonctionnement de l'algorithme	38
3.4.4 Algorithme de base.....	40
3.5 La methode d'optimisation par essaim de particules binaire (BPSO)	41
3.5.1 Origine	41

Table de matière

3.5.2 Principe de l'algorithme	41
3.5.3 Formalisation de l'algorithme	41
3.6 Fonction de fitness.....	43
3.6.1 Définition.....	44
3.6.2 Objectif de la fonction de fitness.....	44
3.6.3 Expression de la fonction de fitness utilisée.....	44
3.7 Conclusion	45
Chapitre 4: Implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO.....	46
4.1 Introduction	47
4.2 Outils et environnement de développement : MATLAB R2014a...47	
4.2.1 Présentation de MATLAB R2014a.....	47
4.2.2 Raisons du choix de MATLAB R2014a.....	47
4.2.3 Architecture de la simulation	48
4.3 Protocole SEP : Implémentation et Détails	49
4.3.1 Description du protocole SEP	49
4.3.2 Structure du code et organisation des modules	49
4.3.3 Modélisation des nœuds hétérogènes (normaux et avancés).....	50
4.3.4 Calcul des probabilités de sélection des CH (Chefs de Cluster).....	50
4.3.5 Association aux clusters.....	50
4.3.6 Pseudocode de l'implémentation de SEP en MATLAB.....	51
4.4 Algorithme PSO : Implémentation et Détails.....	52
4.4.1 Principes fondamentaux de l'algorithme PSO.....	52
4.4.2 Structure du code et organisation des modules	52
4.4.3 Initialisation des particules PSO.....	53
4.4.4 Fonction fitness	53
4.4.5 Mise à jour des vitesses et positions.....	54
4.4.6 Adaptations spécifiques pour les réseaux de capteurs sans	

Table de matière

fil	54
4.4.7 Pseudocode de l'implémentation de PSO	55
4.5 Protocole BPSO : Implémentation et Détails	56
4.5.1 Présentation de l'algorithme BPSO et de ses différences avec PSO.....	56
4.5.2 Structure du code et organisation des modules	56
4.5.3 Initialisation des particules BPSO.....	57
4.5.4 Calcul de la fitness	58
4.5.5 Mise à jour des vitesses et positions.....	58
4.5.6 Points particuliers de l'implémentation binaire	59
4.5.7 Pseudocode de l'implémentation de BPSO.....	59
4.6 Evaluation des performances.....	60
4.6.1 Paramètres initiaux	60
4.7 Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66
Conclusion générale.....	67
Bibliographie	68

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1 : Les composants d'un capteur.....	7
Figure 1.2 : Exemple de réseaux de capteur	11
Figure 2.1 – Classification des protocoles de routage dans les RCSF	22
Figure 2.2 – Topologie plate.....	23
Figure 2.3 – Topologie hiérarchique.....	23
Figure 2.4 – Topologie géographique.....	24
Figure 3.1 organigramme PSO.....	34
Figure 3.2 organigramme BPSO.....	38
Figure 3.3 organigramme SEP.....	41
Figure 4.1 – Extrait du code de la modélisation des nœuds hétérogènes	49
Figure 4.2 – Extrait du code du calcul des probabilités de sélection des CH	49
Figure 4.3 – Extrait du code d'association aux clusters.....	50
Figure 4.4 – Extrait du code d'initialisation des particules(PSO).....	52
Figure 4.5 – Extrait du code de la fonction fitness.....	52
Figure 4.6 – Extrait du code du Mise à jour des vitesses et positions.....	53
Figure 4.7 – Extrait du code d'initialisation des particules (BPSO).....	56
Figure 4.8 – Extrait du code de la fonction fitness (BPSO).....	57
Figure 4.9 – Extrait du code du Mise à jour des vitesses et positions (BPSO).....	57
Figure 4.10 Evolution du nombre de nœuds morts.....	59
Figure 4.11 Consommation totale d'énergie.....	60
Figure 4.12 Taux de paquets transmis à la station de base.....	61

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : les principaux protocoles de routage dans un RCSF

Tableau 2.2 : les principaux protocoles de routage dans RCSF a découverte de route

Tableau 2.3 : les principaux protocoles de routage dans RCSF à paradigme de communication

Tableau 2.4 Les principaux protocoles de routage dans RCSF à fonctionnement du protocole

Tableau 2.5 Comparaison entre ces différents protocoles

Tableau 4.1 : Nombre de nœuds morts

Tableau 4.2 : Consommation totale d'énergie

Tableau 4.3 : Nombre de paquets transmis

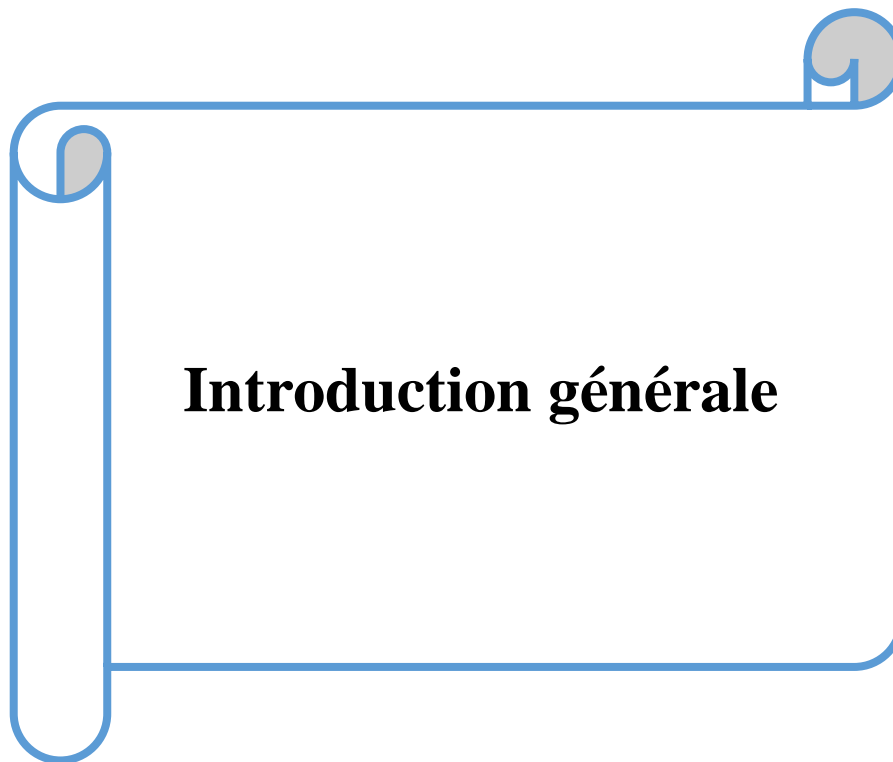
Tableau 4.4 : Synthèse qualitative

Liste des acronymes

Liste des acronymes

WPAN	Le réseau personnel sans fil
WLAN	Le réseau local sans fil
WMAN	Le réseau métropolitain sans fil
BLR	Boucle Locale Radio
WWAN	Le réseau étendu sans fil
RCSF	Réseau capteur sans fil
APTEEN	Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol
CTP	Collection Tree Protocol
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
TEEN	Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network
DD	Directed Diffusion
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
PEDAP	Power Efficient Data Gathering and Aggregation Protocol
RR	Reliable Routing Protocols
SAR	Sequential Assignment Routing
SPEED	Socio-Physical Event-driven and Efficient Data Dissemination
SPIN	Sensor Protocol for information via negotiation
PEGASIS	Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
GSR	Global State Routing
PSO	Particle Swarm Optimization
BPSO	Binary Particle Swarm Optimization
SEP	Stable Election Protocol
WSN	Wireless Sensor Network

Introduction générale



Introduction générale

Introduction générale :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent aujourd'hui une avancée majeure dans le domaine des technologies de l'information communication. Constitués de petits dispositifs électroniques appelés nœuds capteurs, ces réseaux sont capables de collecter, traiter et transmettre des données issues de leur environnement, sans nécessiter d'infrastructure filaire. Grâce à leur flexibilité de déploiement et à leur capacité à fonctionner de façon autonome, les RCSF sont devenus incontournables pour de nombreuses applications, allant de la surveillance environnementale à la gestion industrielle, en passant par la sécurité, la santé connectée ou encore l'agriculture de précision. Leur fonctionnement repose sur la collaboration de nombreux nœuds, chacun équipé de capteurs, d'unités de traitement, de modules de communication et d'une source d'énergie généralement limitée. Cette organisation permet de surveiller des zones étendues ou difficiles d'accès, de détecter des événements en temps réel et d'automatiser la collecte d'informations dans des contextes variés. L'évolution rapide des composants électroniques, la miniaturisation et la baisse des coûts ont permis d'envisager des déploiements à grande échelle, rendant les RCSF accessibles à un large éventail d'utilisateurs et d'applications.

Cependant, la conception et l'exploitation des réseaux de capteurs sans fil posent de nombreux défis. Les contraintes énergétiques, dues à l'autonomie limitée des batteries, imposent une gestion rigoureuse de la consommation pour prolonger la durée de vie du réseau. La sécurité des communications, essentielle pour garantir l'intégrité et la confidentialité des données, doit être assurée malgré les ressources limitées des nœuds. La diversité des environnements de déploiement, la dynamique des topologies, ainsi que la nécessité d'auto-organisation et d'adaptabilité ajoutent encore à la complexité de ces systèmes.

Face à la diversité des applications et à la complexité croissante des environnements dans lesquels ils sont déployés, comment concevoir, organiser et sécuriser des réseaux des capteurs sans fil capables de répondre efficacement aux contraintes d'énergie, de fiabilité et de sécurité, tout en assurant une collecte et une transmission optimales des données ?

Introduction générale

À travers une analyse détaillée, ce mémoire vise à apporter des éléments de réponse à cette problématique, en mettant en lumière les fondements, les défis et les perspectives d'évolution des réseaux de capteurs sans fil.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous définissons les réseaux de capteurs sans fil, leur architecture leurs domaines d'applications et les contraintes liées à ce type de réseau.

Le deuxième chapitre est consacré au routage dans les réseaux de capteurs sans fil, ainsi que certains exemples de protocoles qui ont été élaborés dans des travaux récents réalisés dans le but de conserver l'énergie des nœuds capteurs.

Le troisième chapitre concerne les métaheuristiques PSO, BPSO et le protocole SEP

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons l'objectif de notre solution et le mécanisme qu'on va utiliser pour l'atteindre. Nous présentons certains exemples de simulateurs dédiés aux réseaux de capteurs sans fils.

On conclut ce mémoire par une conclusion générale ; Nous proposons également des perspectives de recherche futures.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil



Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

1.1 Introduction :

Un réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est composé d'un ensemble de petites unités appelées 'nœuds capteurs'. Ces réseaux sont super importants dans le monde des systèmes embarqués et des communications sans fil. Les "nœuds" peuvent recueillir des informations pertinentes comme la température, la pression, ou même un mouvement, et les envoient ensuite à des points de traitement.

Dans ce chapitre, on va plonger dans l'univers des RCSF. On va voir comment ils sont organisés, quels défis ils rencontrent, et les questions clés que les ingénieurs et les chercheurs doivent gérer quand ils les conçoivent et les mettent en place. On va aussi regarder de plus près les protocoles de routage conçus pour économiser l'énergie, un aspect important des RCSF. Notre but, est de dresser un état de l'art assez modeste de cette question.

1.2. Réseau sans fil :

Un réseau sans fil est un réseau informatique ou numérisé qui connecte différents postes ou systèmes entre eux par ondes radio. Il peut être associé à un réseau de télécommunications pour réaliser des interconnexions entre nœuds. La norme la plus utilisée actuellement pour les réseaux sans fil est la norme IEEE802.11, mieux connue sous le nom de Wi-Fi [01].

1.2.1. Les catégories des réseaux sans fil :

Il existe plusieurs types de réseaux sans fil, classés en fonction de leur taille et de ce qu'ils permettent de faire :

Le réseau personnel sans fil (WPAN) :

- C'est le réseau sans fil de proximité, celui qui ne porte pas très loin (quelques dizaines de mètres).
- On l'utilise surtout pour connecter des appareils entre eux : une imprimante à un ordinateur, un téléphone à des écouteurs, etc.
- Les technologies les plus connues sont le Bluetooth, le ZigBee et l'infrarouge.

Le réseau local sans fil (WLAN) :

- Celui-ci a une portée un peu plus grande, environ une centaine de mètres.
- Il sert à connecter des appareils qui se trouvent dans la même zone.
- Les deux technologies qui se partagent le marché sont le Wi-Fi et le HiperLAN 2.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

Le réseau métropolitain sans fil (WMAN) :

- On l'appelle aussi Boucle Locale Radio (BLR).
- C'est un réseau qui permet d'envoyer de la voix et des données à haut débit grâce à une antenne parabolique installée sur un toit. Ça sert surtout pour l'accès à internet et la téléphonie.
- Le plus connu des réseaux WMAN (Wimax).

Le réseau étendu sans fil (WWAN) :

- C'est le réseau cellulaire mobile, celui qu'on utilise tous les jours avec nos téléphones.
- Les technologies principales sont le GSM, le GPRS et l'UMTS.

1.3. Capteur sans fil :

Un capteur sans fil est un équipement qui permet de mesurer une grandeur physique dans l'environnement qui l'entoure, telle que la température, le taux d'humidité, des vibrations et qui la transforme en une grandeur numérique capable d'être traitée informatiquement. Un capteur seul peut permettre des applications locales.

Par exemple : un capteur de présence va permettre d'éclairer une lampe lors du passage d'une personne [2].

1.3.1. Architecture d'un capteur sans fil :

Un capteur est composé de quatre unités de base (figure 1) :

1. **L'unité d'acquisition :** elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs (AnalogDigital Converter). Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.

2. **L'unité de traitement :** elle est composée de deux interfaces qui sont une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition et stocker les données collectées.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

3. Un module de communication (Transceiver) : il est composé d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du Réseau via un support de communication radio.

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 la 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) [10].

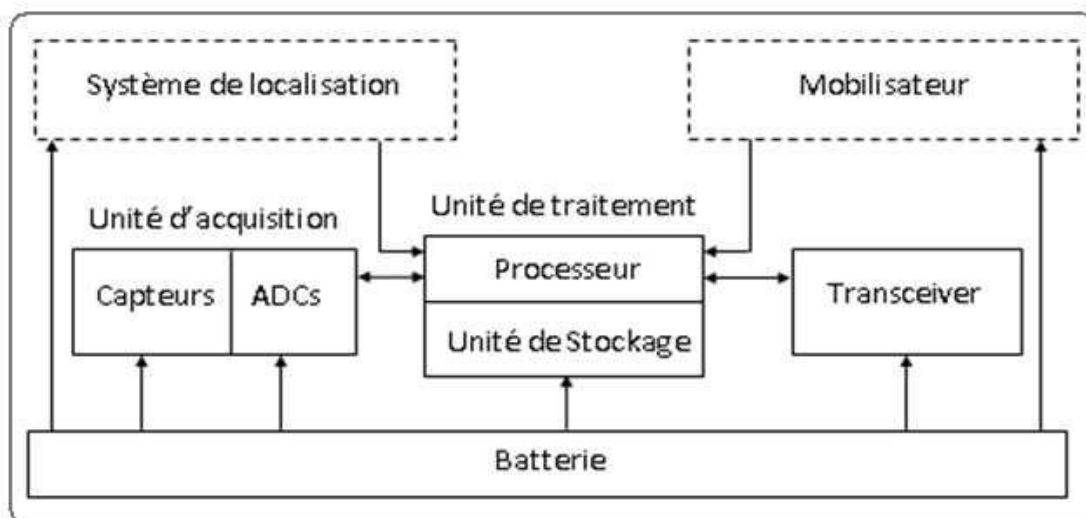


Figure 1.1 : Les composants d'un capteur [10]

1.4. Réseaux de Capteurs sans fil :

Un RCSF est composé d'un grand nombre de capteurs placés dans une zone d'intérêt donnée et qui coopèrent ensemble dans le but d'accomplir une tâche commune. Cette dernière peut être la surveillance d'un champ de bataille dans les applications militaires, la surveillance d'une zone à risque ou difficile d'accès, la surveillance de l'environnement, la surveillance d'un parking, d'un entrepôt, d'une place publique, la surveillance d'une forêt afin de pouvoir détecter en temps réel des feux de forêts, la surveillance de troupeaux pour les pâturages, le contrôle de production dans l'industrie, le contrôle et le suivi environnemental, etc [3].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

1.4.1. Historique des Réseaux de capteurs sans fil :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont vu le jour dans les années 1990, marquant une avancée significative dans le domaine des technologies de communication. Avant cette période, la transmission des données des capteurs nécessitait un câblage coûteux et complexe, rendant leur déploiement difficile dans des environnements variés. L'émergence des techniques sans fil a permis de surmonter ces limitations, ouvrant la voie à l'utilisation de micro-capteurs autonomes capables de collecter et transmettre des données environnementales.

Évolution historique :

- **Avant les années 1990 :** Les systèmes de capteurs étaient principalement câblés, limitant leur flexibilité et leur accessibilité. Les quelques dispositifs sans fil disponibles étaient souvent des balises radio utilisées dans des applications spécifiques.
- **Années 1990 :** L'essor des technologies sans fil a permis le développement de nouveaux réseaux de capteurs. Cette période a été marquée par des recherches intensives dans les domaines environnemental et industriel, où la nécessité de surveiller en temps réel divers phénomènes a conduit à l'idée de créer un "système nerveux central" pour la Terre, comme l'a décrit le professeur Pister de l'Université de Californie à Berkeley [4].
- **Avancées technologiques :** Les progrès en microélectronique et en microtechnique ont permis la miniaturisation des capteurs, rendant possible leur intégration dans des réseaux ad hoc. Ces réseaux sont devenus capables de fonctionner de manière autonome, collectant et transmettant des données vers un point central ou un nœud-puits [5] [6].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

- **Applications militaires et civiles :** Initialement développés pour des applications militaires telles que la surveillance et le suivi, les RCSF ont rapidement trouvé leur place dans des domaines civils comme l'agriculture de précision, la gestion environnementale et la santé connectée [6] [7].
- **Reconnaissance et impact :** Les RCSF sont aujourd'hui reconnus comme une technologie clé qui transforme notre manière d'interagir avec l'environnement. Le magazine Technology Review du MIT les a même classés parmi les dix nouvelles technologies susceptibles de bouleverser le monde [6].

1.4.2. Caractéristiques des Réseaux de capteurs sans fil :

Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) :

- **Réseau «ad hoc» :** Les RCSF sont des réseaux ad hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales de manière autonome [5] [6]. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée, et ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique [6].
- **Routage multi-saut :** Les données captées par les nœuds sont acheminées grâce à un routage multi-saut à un nœud considéré comme un "point de collecte", appelé nœud-puits (sink) [5] [6].
- **Micro-capteurs comme systèmes embarqués:** Les progrès conjoints de la microélectronique, microtechnique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût raisonnable des micro-capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseaux[5] [6]. Ces micro-capteurs sont de véritables systèmes embarqués [5] [6] [8].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

- **Densité importante des nœuds** : Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée [9].
- **Topologie dynamique** : La topologie des réseaux de capteurs est instable ou dynamique, ce qui peut être dû à la mobilité des nœuds, à la défaillance des nœuds ou à l'ajout de nouveaux nœuds [9].
- **Auto-organisation** : L'auto-organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance [9]. Les nœuds doivent savoir localiser leurs voisins et établir des routes pour que l'information puisse circuler à travers le réseau [9].
- **Scalabilité et adaptabilité** : Les RCSF présentent une importance des nombres de nœuds qui peut parfois atteindre des millions en vue d'une meilleure granularité de surveillance, avec une polyvalence de remplacement en cas de défaillance [8].
- **Caractéristiques du trafic interrompu** : L'accès sans fil est perturbé par les interférences inévitables au sein d'un RCSF [8].
- **Réduction de la consommation d'énergie** : La gestion de l'énergie au sein d'un RCSF est limitée du fait que les capteurs sont alimentés par des batteries qui ne peuvent être changées par suite des milieux hexogènes défavorables [8].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

1.5. Architecture d'un RCSF :

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) comprend plusieurs éléments et aspects essentiels, allant des composants physiques aux modèles de communication en couches [4].

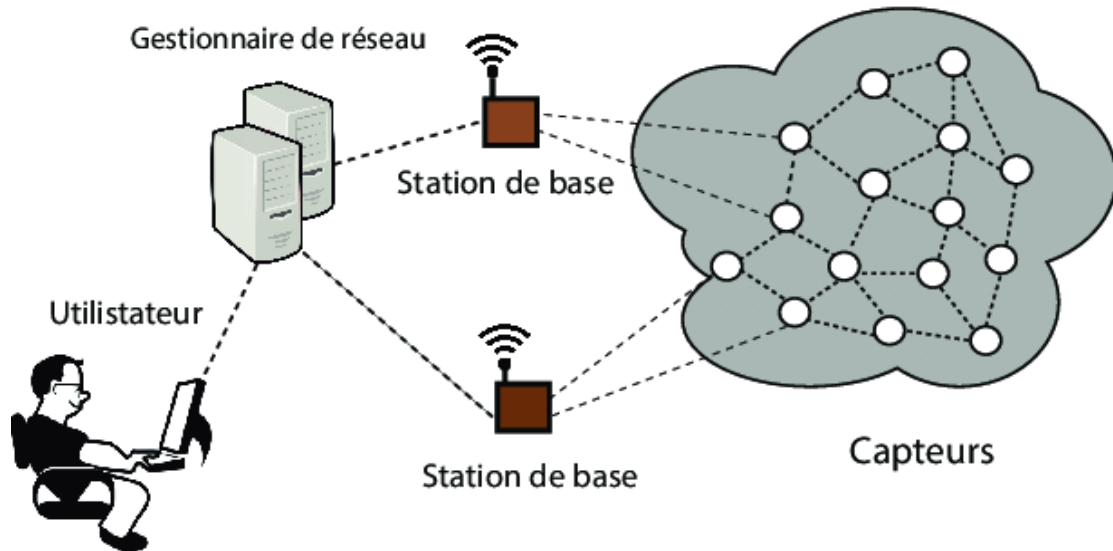


Figure 1.2 : Exemple de réseaux de capteur [9]

1.5.1. Composants Principaux :

- **Nœuds capteurs** : Les nœuds capteurs sont au cœur du RCSF. Chaque nœud contient généralement quatre unités de base : une unité de captage, une unité de traitement, une unité de transmission, et une unité de contrôle d'énergie [5] [11]. L'unité de captage, souvent composée d'un récepteur et d'un transducteur, mesure les paramètres environnementaux et convertit ces mesures en signaux électriques [5] [8] [11]. L'unité de traitement, généralement un processeur avec une petite unité de stockage, traite les signaux et exécute les protocoles de communication [5]. L'unité de transmission permet la communication sans fil avec d'autres nœuds [5] [12]. Des composants additionnels comme un GPS ou un générateur d'énergie peuvent être ajoutés selon l'application [5] [11].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

- **Nœud-puits (Sink) :** Le nœud-puits agit comme un point de collecte centralisant les données du réseau [4] [11]. Il possède généralement plus de ressources matérielles que les nœuds capteurs et sert d'interface entre le RCSF et l'utilisateur [4] [13].
- **Zone d'intérêt :** La zone d'intérêt, aussi appelée "champ de captage", est la zone géographique où les capteurs sont déployés pour surveiller divers phénomènes.

1.5.2 Modèle en couches :

L'architecture de communication d'un RCSF peut être structurée en plusieurs couches, similaires au modèle OSI, mais adaptées aux contraintes spécifiques des RCSF [11]. Ces couches comprennent [11] :

- **Couche Physique :** Responsable de la sélection de fréquence, de la génération de la fréquence de porteuse, de la détection du signal, de la modulation/démodulation et du cryptage/décryptage des données. Le choix du schéma de modulation/démodulation ou la bande de fréquence utilisée affecte la consommation d'énergie.
- **Couche Liaison de Données :** Le protocole MAC (Media Access Control) de cette couche assure la gestion de l'accès au support physique, le multiplexage des flots de données, la détection de la trame de données, le contrôle d'erreur et de l'accès au média.
- **Couche Réseau :** Des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi-sauts sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau. L'efficacité en consommation d'énergie, la nature centrée données et la localisation sont des éléments importants.
- **Couche Transport :** Interface entre la couche application et la couche réseau, elle gère le multiplexage/démultiplexage des messages entre les applications et la couche réseau.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

1.5.3 Architecture réseau :

- **Topologie en étoile :** Une station de base communique directement avec plusieurs nœuds, qui ne peuvent communiquer qu'avec cette station de base [05]. Cette topologie est simple et économe en énergie pour les nœuds, mais vulnérable si la station de base tombe en panne [5].
- **Topologie point par point :** Tout nœud peut communiquer avec n'importe quel autre nœud à portée, ou via des nœuds intermédiaires [5]. Cette approche offre une meilleure évolutivité et tolérance aux pannes, mais consomme plus d'énergie [5].
- **Réseaux Plats :** Dans cette architecture, tous les nœuds ont les mêmes capacités, à l'exception du sink [13].
- **Réseaux Hiérarchiques :** Les nœuds ont des capacités différentes, créant une hiérarchie au sein du réseau [13].

1.5.4 Plan de gestion :

Les plans de gestion sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement du RCSF, en particulier en ce qui concerne l'énergie, la mobilité et les tâches [11] :

- **Gestion de l'énergie :** Étant donné que les nœuds sont alimentés par des batteries, la gestion de l'énergie est cruciale. Les techniques d'économie d'énergie sont essentielles pour prolonger la durée de vie du réseau [11].
- **Gestion de la mobilité :** Dans les RCSF où les nœuds sont mobiles, la gestion de la mobilité est importante pour maintenir la connectivité et assurer la transmission des données.
- **Gestion des tâches :** La gestion des tâches permet de coordonner les activités des différents nœuds et d'optimiser l'utilisation des ressources du réseau.

1.6. Sécurité des RCSFs :

La sécurité des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est un domaine important en raison des vulnérabilités spécifiques qui découlent de leurs caractéristiques intrinsèques. Voici un aperçu des principaux aspects liés à la sécurité dans ces réseaux.

1.6.1. Spécificités et Vulnérabilités :

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

Les RCSF sont souvent déployés dans des environnements non sécurisés, ce qui les rend particulièrement sensibles aux attaques. Les principales spécificités qui contribuent à leur vulnérabilité incluent :

- **Ressources limitées** : Les nœuds capteurs disposent de capacités de traitement et d'énergie limitées, ce qui complique l'implémentation de solutions de sécurité complexes [14] [15].
- **Communication sans fil** : La nature sans fil des communications expose les données à des interceptions potentielles, rendant les réseaux vulnérables aux attaques passives (écoute) et actives (modification ou destruction des données) [14] [15].
- **Déploiement dans des zones inaccessibles** : Les capteurs sont souvent installés dans des lieux difficiles d'accès, ce qui rend leur protection physique difficile et augmente le risque de vol ou de destruction [14].

1.6.2. Types d'Attaques :

Les RCSF peuvent être ciblés par divers types d'attaques, notamment :

- **Attaques actives** : Ces attaques impliquent la manipulation directe des données, comme le vol ou la destruction de capteurs.
- **Attaques passives** : L'attaquant écoute les communications pour recueillir des informations sans perturber le réseau [14] [15].
- **Attaques sur le routage** : Des attaques peuvent cibler les protocoles de routage pour perturber la transmission des données entre les nœuds [15].

1.6.3. Solutions de Sécurité :

Pour contrer ces menaces, plusieurs solutions ont été proposées :

- **Cryptographie** : L'utilisation de méthodes cryptographiques adaptées pour protéger les données transmises est essentielle. Cela inclut le chiffrement des messages pour assurer leur confidentialité et leur intégrité [14] [15].
- **Gestion des clés** : Établir un protocole efficace pour la gestion des clés est important pour sécuriser les communications entre les nœuds [15].
- **Détection d'intrusions** : Des mécanismes de détection d'intrusions peuvent être mis en place pour identifier et répondre aux activités suspectes au sein du réseau [14].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

- **Partitionnement des données** : Cette technique consiste à diviser les données en plusieurs segments afin de réduire le risque d'exposition complète en cas d'interception [14].

1.7. Applications des réseaux de capteurs sans fil :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) trouvent des applications variées dans des domaines aussi divers que l'environnement, la santé, l'agriculture ou la sécurité. Voici une synthèse des principaux usages, illustrés par des exemples concrets :

1.7.1 Surveillance environnementale : Les RCSF permettent de monitorer des phénomènes complexes sur de vastes zones :

- **Détection de polluants** : Capteurs chimiques mesurant la qualité de l'air (NO₂, ozone, métaux lourds) ou l'eau (fuites industrielles, radioactivité) [5] [16].
- **Prévention des catastrophes naturelles** :

Feux de forêt : Déploiement de thermo-capteurs pour détecter les incendies naissants [9] [17].

Séismes/volcans : Surveillance des activités sismiques ou des émissions gazeuses volcaniques [5] [2].

Inondations : Capteurs de pression intégrés dans les digues pour anticiper les risques [16] [17].

1.7.2. Santé et médecine : Les RCSF transforment la prise en charge médicale :

- **Surveillance des patients** :

Capteurs implantables : Mesure de la glycémie, tension artérielle ou rythme cardiaque via des micro-capteurs sous-cutanés [9] [16].

Imagerie médicale : Capteurs vidéo miniatures implantés pour visualiser des organes internes sans chirurgie [16] [17].

Détection précoce de maladies : Surveillance des signes vitaux pour identifier des anomalies (ex. : cancers, chutes chez les personnes âgées) [9] [16].

1.7.3. Agriculture et gestion des ressources : Les RCSF optimisent les pratiques agricoles :

- **Irrigation intelligente** : Capteurs de sol détectant les zones sèches pour ajuster l'arrosage [9] [17].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

- **Suivi du bétail** : Localisation en temps réel des troupeaux pour éviter les pertes ou les conflits [16] [17].
- **Contrôle des cultures** : Surveillance des paramètres climatiques (température, humidité) pour améliorer les rendements [5] [17].

1.7.4. Sécurité et surveillance : Les RCSF renforcent la protection des infrastructures et des zones sensibles :

- **Détection d'intrusions** : Réseaux de capteurs de mouvement pour sécuriser des sites militaires, des ponts ou des voies ferrées [5] [17].
- **Gestion des risques industriels** : Surveillance des barrages ou des réseaux de transport pour anticiper les défaillances structurelles [9] [17].
- **Détection de menaces chimiques/biologiques** : Utilisation militaire pour analyser le champ de bataille avant l'envoi de troupes [5] [16].

1.7.5. Transports et logistique : Les RCSF améliorent l'efficacité des systèmes de transport :

- **Contrôle du trafic** : Optimisation des flux routiers ou ferroviaires via des capteurs de pression et de mouvement [5] [17].
- **Suivi des marchandises** : Surveillance des conditions de stockage (température, humidité) pour les denrées périssables [16] [17].

1.7.6. Domotique et gestion énergétique : Les RCSF intègrent les bâtiments intelligents :

- **Automatisation des bâtiments** : Régulation de la température, éclairage ou sécurité via des capteurs connectés [5] [16].
- **Réduction de la consommation énergétique** : Optimisation des systèmes HVAC (chauffage, ventilation, climatisation) [5] [17].

1.7.7. Applications militaires : Bien que souvent associés à la science-fiction, les RCSF ont des usages concrets dans le domaine militaire :

- **Surveillance tactique** : Déploiement de capteurs pour détecter des mouvements ennemis ou analyser le terrain [5] [16].
- **Détection de menaces** : Capteurs chimiques ou radiologiques pour identifier des agents dangereux [5] [16].

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil

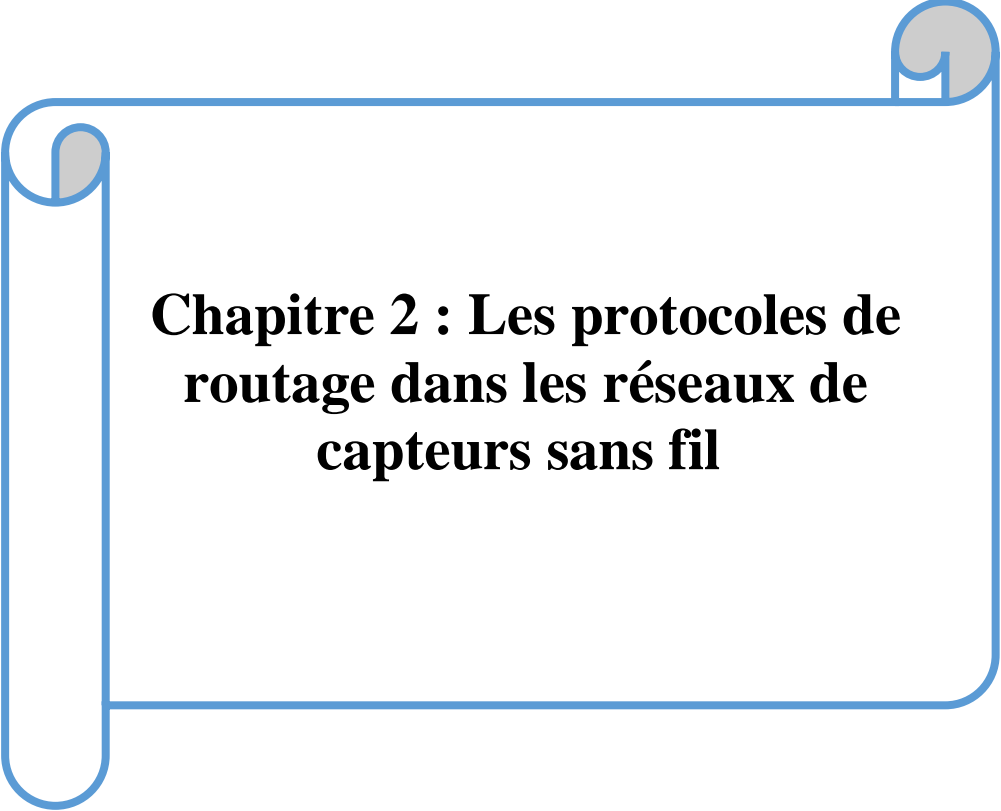
1.8. Conclusion :

Ce chapitre a analysé les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sous l'angle de leur architecture, applications et enjeux techniques. Ces systèmes, composés de nœuds capteurs autonomes, s'auto-organisent pour collecter et transmettre des données environnementales, sanitaires ou industrielles.

Leur impact scientifique réside dans leur capacité à répondre à des défis complexes : surveillance à grande échelle, gestion énergétique optimisée, ou intégration dans des environnements hostiles. Les RCSF illustrent une synergie entre microélectronique, informatique et ingénierie, avec des applications validées dans des domaines comme la surveillance écologique ou la télémédecine.

En synthèse, les RCSF représentent un outil scientifique majeur, dont l'évolution continuera d'influencer les domaines de l'environnement, de la santé et de l'industrie.

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



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

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

2.1 Introduction :

L'objectif principal d'un protocole de routage dans un réseau de capteurs sans fil est de créer un cheminement optimal et efficace entre une paire de nœuds ; une unité émettrice (nœud ou base station) et une autre unité de destination afin que les messages soient transmis. un protocole de routage permet aux nœuds de communiquer directement les uns avec les autres pour relayer et envoyer des messages, éventuellement sur plusieurs sauts ; et les délivrer à la station de base. Dans ce chapitre nous présentons une classification des principaux protocoles de routage dans les RCSF.

2.2. Le routage

2.2.1. Définition : Le routage est une tâche assez ardue difficile mettant en œuvre un ensemble de nœuds capteurs et de relais éventuels qui collaborent pour l'acheminement de l'information d'une source à une destination. Afin d'obtenir un routage optimal ; des fonctions de routage (algorithmes, protocoles, équations,...) parfois très avancées sont utilisées et elles prennent en considération les caractéristiques et ressources, souvent limitées, techniques, physiques, matérielles et logicielles les fonctions de routage (procédures, protocoles etc.) et plus particulièrement des niveaux d'énergie des composants du réseau de capteurs sans fil niveau d'énergie. [18]

2..2.2 Caractéristiques de routage dans RCSF : [19]

- Il n'existe un système d'adressage global concernant les nœuds capteurs dont le nombre est très souvent très élevé
- Les données envoyées sont, généralement, issues de sources diverses et multiples qui doivent être envoyées vers la destination de traitement
- Les nœuds capteurs exigent ainsi une gestion soignée des ressources matérielles (telle que l'énergie).
- Parfois, plusieurs capteurs situés dans des zones proches peuvent produire les mêmes données relatives à un phénomène surveillé, ce qui induit une redondance des données.

2.3 Les protocoles de routage dans RCSF :

2.3.1. Définition de la notion de protocole :

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

Un protocole est un ensemble de règles, de méthodes et de procédures assurant un standard de communication entre les entités, éventuellement de plusieurs types, du réseau. L'ensemble de ces moyens sont regroupés dans un même et unique langage appelé « protocole » [18]

Les protocoles de routage sont utilisés afin d'acheminer de façon correcte et optimale les données sur le réseau. Ces protocoles doivent répondre à un certain nombre d'exigences et sont conçus, implémentés et utilisés de manière à réduire les coûts de communication et à ne pas consommer plus d'énergie que nécessaire [19]

2.4 Principaux critères pour le développement d'un protocole de routage

La performance des réseaux de capteurs sans fil repose sur les éléments suivants :

- **Evolutivité** : la capacité d'évolution d'un réseau de capteur sans fil constitue un élément important. Dans les réseaux de capteurs sans fil, une zone de réseau n'est pas obligatoirement fixe mais peut évoluer ou régresser selon les exigences des utilisateurs. Les protocoles de routage doivent tenir compte de ces changements et s'y adapter [10].
- **L'énergie** : Chaque nœud consomme peu d'énergie pour des tâches comme la détection, le traitement, l'entreposage et la transmission. Un nœud du réseau doit être en mesure de déterminer la quantité d'énergie nécessaire pour accomplir une tâche qui lui est assignée. La consommation d'énergie peut fluctuer en fonction du type de fonctionnalité ou de la tâche qu'il doit réaliser [10] [20].
- **Le temps de traitement** : Il s'agit du temps que le nœud du réseau consacre à réaliser l'opération complète, depuis la détection et le traitement des données jusqu'au stockage de ces dernières, sans oublier la transmission ou la réception sur le réseau [20].
- **Le schéma de transmission** : L'envoi de données des nœuds capteurs vers la destination ou la station de base est effectué à l'aide d'un schéma de routage à un seul saut ou multi-saut [10].
- **La capacité du réseau** : tous les nœuds dans le système de capteurs exploitent certaines ressources réseau pour mener à bien diverses tâches telles que la détection ou la conversion [10].

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

- **La synchronisation** : Dans le cadre des transmissions radio entre les capteurs d'un réseau de capteurs sans fil, ceux-ci doivent constamment écouter les signaux pour rester synchronisés, ce qui peut entraîner une consommation excessive d'énergie s'ils ne sont pas correctement synchronisés entre eux. Pour ce faire, un nœud doit partager la même notion temporelle que ses voisins pour entrer en mode veille et se réactiver [20].
- **Gestion des paquets** : Un paquet transmis avant le passage de deux nœuds est désigné comme le paquet de contrôle. Le paquet de contrôle renferme le nombre de bits transmis, l'adresse du nœud destinataire et des renseignements visant à prévenir les collisions lors de la transmission [20].

2.5 Classification des protocoles de routage dans les RCSF

On peut classer les protocoles de routage dans les RCSF en trois catégories distinctes [21, 22]

- La structure de réseau
- Le processus de découverte des routes
- La stratégie de routage du protocole
- Le paradigme de communication

Toutefois, certains protocoles de routage peuvent être catégorisés dans plusieurs classes et sous-classes, comme le montre la figure 2.1 :

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

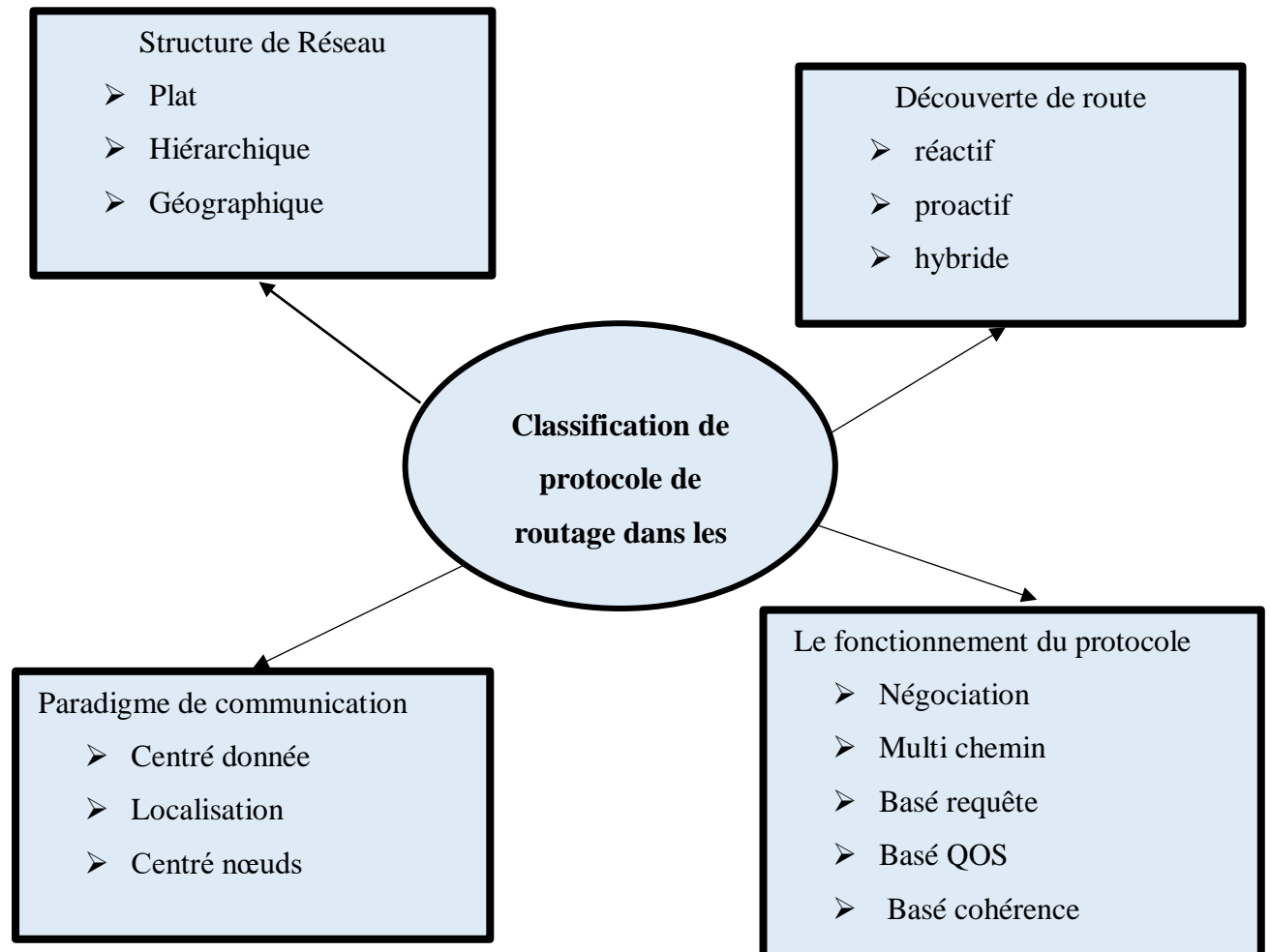


Figure 2.1 – Classification des protocoles de routage dans les RCSF [23] [26]

2.5.1 Classification selon la structure du réseau

A. Structure de réseau : détermine la méthode pour organiser les données qui sont transformée entre les nœuds et la base station. On distingue trois topologies [19]

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

A.1 Protocoles de routage à plat : Dans une topologie dite plate, tous les capteurs jouent un rôle identique et coopèrent pour réaliser la tâche de routage. Les réseaux plats se distinguent par la simplicité de leur protocole de routage, un coût d'entretien faible, une forte résilience aux défaillances ainsi qu'une capacité à créer de nouvelles routes en réponse aux modifications de la topologie. Néanmoins, le réseau présente une capacité de mise à l'échelle limitée en raison du volume élevé de messages de contrôle [20].

L'organisation des capteurs dans une topologie plate est représentée dans la figure 2.2 ci-dessous.

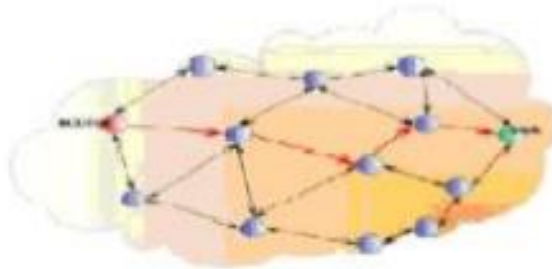


Figure 2.2 – Topologie plate [20]

A.2 Protocoles de routage hiérarchique : ce protocole se compose de clusters. Chaque cluster inclut un groupe des nœuds appelés membre de cluster et un cluster Head (CH) qui est chargé de collecter les informations auprès des membres (nœuds) au sein du cluster pour les agréger et envoyer à la station de base (Sink). Chaque CH peut communiquer avec d'autre cluster Head [19]

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

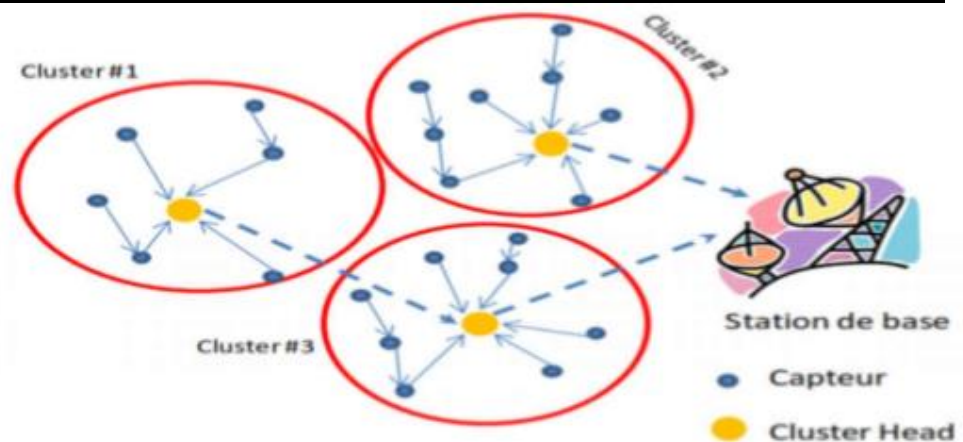


Figure 2.3 – Topologie hiérarchique [20, 30]

A.3 Les protocoles de routage géographique : Les protocoles géographiques, également connus sous le nom de protocoles de routage basés sur la localisation, exploitent les données de positionnement pour orienter la découverte et la transmission des informations. Ils autorisent la diffusion unidirectionnelle de l'information en prévenant une saturation d'information sur l'ensemble du réseau. [25]

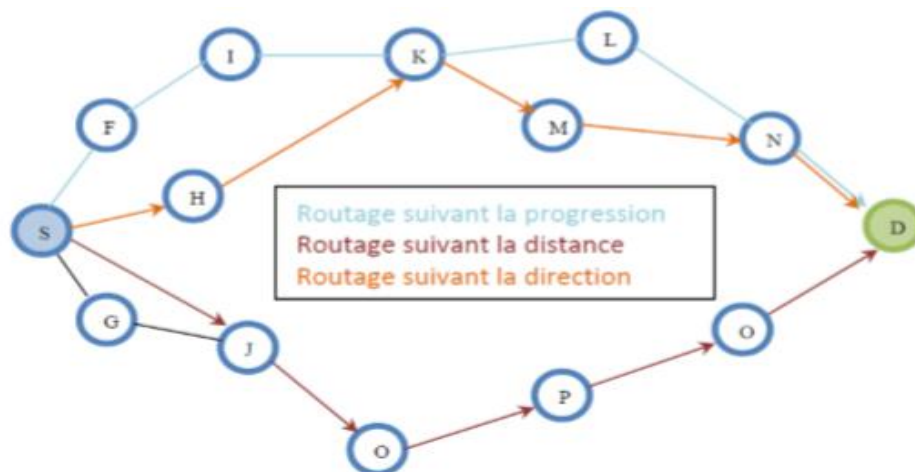


Figure 2.4 – Topologie géographique [24]

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

Topologie Protocole	Plat	Hiérarchique	Géographique
APTEEN		✓	
CTP	✓		
GEAR			✓
GPSR			✓
HEED		✓	
LEACH		✓	
SPIN	✓		
TEEN		✓	
SEP		✓	

Tableau 2.1 : les principaux protocoles de routage dans un RCSF

B. Découverte de route (l'établissement de route) : spécifie comment les différents chemins sont créés lors du routage de réseau. IL est classé en trois types [19]

B.1 Les protocoles réactifs : Ce sont des protocoles qui calculent la route sur demande avant d'effectuer le routage, et n'ont pas besoin de connaître la topologie du réseau ou d'échanger périodiquement des informations sur le routage. L'aspect « sur demande » du routage élimine la nécessité de mettre à jour la route, mais augmente le délai de démarrage du routage à cause du temps de découverte de la route [27].

B.2 Les protocoles proactifs : un protocole qui construit les tables de routage avant que la demande en soit effectuée. Il identifie en fait à chaque instant la topologie du réseau. [28]

Ce genre de protocoles consomme beaucoup de ressources du réseau, du fait de la connaissance préalable de la topologie. [27]

B.3 Les protocoles hybrides : À chaque fois qu'un nœud a besoin de router une information, d'abord, calcule toutes les routes possibles avec la méthode proactive ensuite s'adapte pendant le routage avec la méthode réactive. [19] [27]

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

Découverte Protocole	Réactif	Proactif	Hybride
CBRP			✓
CTP		✓	
DSDV	✓		
DD		✓	
HSR	✓		
LEACH	✓		
ZPR			✓

Tableau 2.2 : les principaux protocoles de routage dans RCSF a découverte de route

C. Paradigme de communication : dans les réseaux capteurs son fil il excite trois paradigmes :

C.1 Centré donnée : Dans ce paradigme le routage ne dépend pas de l'adresse de destination, parce que les données sont plus importantes que le nœud lui-même. Ces données seront propagées de proche en proche pour y arriver à la station de base. [19][29]

C.2 Localisation : Dans cette technique, les décisions de routage sont établies selon la position des nœuds. Un tel type de routage nécessite que les nœuds aient connaissance de leurs positions géographiques. [29]

C.3 Centre nœuds : Ce paradigme le plus populaire actuellement pour les RCSF, et utilise dans les réseaux traditionnels où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants comme les adresses MAC ou IP [19] [29]

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

Paradigme Protocole	Centrée donnée	Localisation	Centré nœuds
DD	✓		
GAF		✓	
GEAR		✓	
LEACH			✓
PEDAP			✓
CTP	✓		

Tableau 2.3 : les principaux protocoles de routage dans RCSF a paradigme de communication

D. Le fonctionnement du protocole : le protocole de routage selon le mode fonctionnement peuvent être classifié en cinq catégories [19]

D.1 Basé-Négociation : La stratégie de routage basé sur la négociation entre les nœuds capteurs avant la transmission des données, afin de s'assurer qu'aucune donnée redondante n'est transférée [22] [19]

D.2 Basé-Multi-chemins : Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau [29]

D.3 Basé requête : la station de base crée des requêtes afin d'interroger les capteurs, c'est-à dire les nœuds de destination (sink) envoie une requête à travers le réseau afin d'obtenir des données, Les requêtes émises par la station de base peuvent aussi être ciblées sur des régions spécifiques du réseau (par exemple SQL : Structured Query Language). [19] [29]

D.4 Basé QOS : le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de donnée En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de qualité de service Par exemple : retard, énergie, largeur de bande passante [18] [19]

D.5 Basé cohérence : Les protocoles basé sur la cohérence manipulent de manière minimale les données et procèdent à une déduplication. Les informations sont transmises aux nœuds de collecte qui, à leur tour, effectuent un traitement supplémentaire avant de les transmettre aux destinataires [19]

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

fonctionnement Protocol	Négociation	Multi-chemins	requête	QOS	cohérence
DD	✓	✓	✓		✓
RR			✓		
SAR	✓	✓		✓	
SPEED		✓		✓	
SPIN	✓		✓		✓

Tableau 2.4 Les principaux protocoles de routage dans RCSF à fonctionnement du protocole

2.6 Les protocoles de routage proposé pour les RCSF :

Dans cette partie, nous proposons certains protocoles de routage citées pour les réseaux de capteurs sans fil.

2.6.1 Protocoles de routage hiérarchiques :

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) :

Est le plus populaire des protocoles de routage hiérarchique, conçu pour le routage dans les réseaux de capteurs homogènes où les capteurs ont les mêmes caractéristiques et les mêmes capacités [20]

L'idée de ce protocole est de former des clusters de nœuds capteurs en se basant sur la force du signal reçue et d'employer le cluster-head local comme routeur du sink, le rôle de cluster-head est échangé aléatoirement entre les nœuds afin d'équilibrer les charges [24]

PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems):

Est une version améliorée du protocole LEACH Au lieu de former plusieurs clusters, PEGASIS forme des chaînes de nœuds de sorte que chaque nœud transmet et reçoit du nœud voisin appartenant à la chaîne. Un seul nœud sélectionné parmi cette chaîne pour transmettre ou la station de base. Il déplace les données reçues de nœud à nœud, puis

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

les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent tous la station de base. Chaque nœud leader, choisi dans un niveau particulier, transmet des données aux nœuds du niveau supérieur de la hiérarchie jusqu'à atteindre la station de base [24 31]

TEEN et APTEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol) :

C'est un protocole hiérarchisé conçu pour réagir aux variations soudaines d'attributs détectés comme la température. Le réseau est conçu selon une architecture hiérarchique où les nœuds à proximité constituent des regroupements. Suite à la formation des grappes, le chef de grappe communique deux seuils aux nœuds. Quelle est la valeur minimale d'un attribut requise pour sa transmission et le changement minimal acceptable de cet attribut ? [24]

APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) :

C'est une version améliorée du TEEN qui se fonde sur la collecte périodique des données et sur la réponse aux événements en temps réel. Lorsque la station de base crée des regroupements, les têtes de cluster transmettent les attributs, les seuils et le calendrier de diffusion à chaque nœud tout en réalisant l'agrégation des informations pour préserver l'énergie. [24]

SAR (Sequential Assignment Routing) :

Est une méthodologie multi-chemins qui vise à atteindre l'efficacité énergétique et la robustesse face aux erreurs. SAR établit des arbres en considérant les indicateurs de qualité de service, la ressource énergétique disponible sur chaque route et le degré d'urgence de chaque paquet. Grâce à l'utilisation de ces arbres, plusieurs chemins reliant le sink aux capteurs sont établis. Il est alors possible d'emprunter une ou plusieurs routes [24]

2.6.2 Protocoles de routage non-hiérarchiques :

SPIN (Sensor Protocol for information via negotiation)

Cette série de protocoles adaptatifs est suggérée pour résoudre le problème d'ignorance des ressources rencontré dans la méthode d'inondation, en recourant à la négociation et à l'adaptation aux ressources existantes. [31]

Deux concepts fondamentaux sous-tendent la conception des protocoles SPIN :

- Si les nœuds de capteurs se contentent, dans leurs transmissions, de transmettre les données qui décrivent les informations collectées et non pas l'intégralité de ces

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

dernières (comme les images), ils peuvent fonctionner de manière plus efficace et ainsi économiser une quantité d'énergie significative. [31]

- Les nœuds de capteurs doivent surveiller constamment les fluctuations dans leurs ressources d'énergie. [31]

DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) :

DSDV est un protocole de routage à vecteur de distance proactif. Chaque nœud du réseau conserve une table de routage qui inclut le prochain saut et le nombre total de sauts pour toutes les destinations envisageables. Des mises à jour régulières de diffusion visent à garantir que la table de routage reste constamment à jour. [24]

GSR (Global State Routing) :

Le protocole GSR présente des similitudes avec le protocole DSDV précédemment détaillé. Ce protocole fait appel aux concepts du routage basé sur l'état des liens (Link State, LS) et les perfectionne en éliminant le procédé peu efficace de saturation des messages de routage. GSR se sert d'une perspective globale de la topologie du réseau, similaire à ce que l'on trouve dans les protocoles fondés sur LS. Le protocole fait également appel à une technique connue sous le nom de méthode de dissémination, employée dans le DBF (Distributed Bellman-Ford). [24]

2.6 Comparaison entre ces différents protocoles :

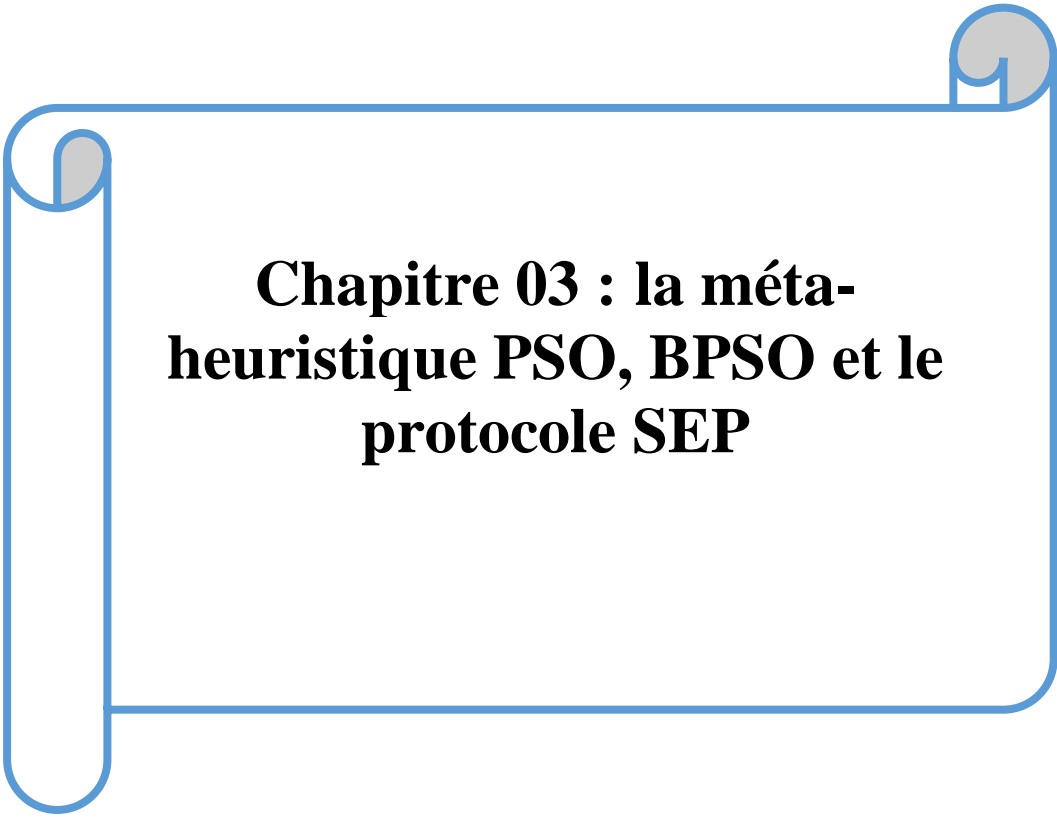
	Classification	Basé sur la négociation	Multi chemin	L'utilisation d'énergie	Agrégation	Mise à l'échelle
LEACH	Hiérarchique	Non	Non	Max	Oui	Bonne
PEGASIS	Hiérarchique	Non	Non	Max	Oui	Bonne
TEEN/APTEEN	Hiérarchique	Non	Non	Max	Oui	Bonne
SAR	Hiérarchique	Oui	Oui	Max	Oui	Bonne
SPIN	Plat	Oui	Oui	Limité	Oui	Bonne
DSDV	Plat	Oui	Oui	Limite	Oui	Bonne
GSR	Plat	Oui	Oui	Limite	Oui	Bonne

Tableau 2.5 Comparaison entre ces différents protocoles

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

2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les protocoles de routage, leur classification selon plusieurs normes et mentionné certains des principaux protocoles pour chaque catégorie.



**Chapitre 03 : la méta-
heuristique PSO, BPSO et le
protocole SEP**

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

3.1 Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil nécessitent des protocoles de routage efficaces pour optimiser la collecte et la transmission des données tout en prolongeant la durée de vie du réseau. Face à la complexité et à la nature combinatoire de ce problème, les approches classiques montrent rapidement leurs limites, notamment en termes de consommation énergétique et d'adaptabilité. C'est dans ce contexte que les méta-heuristiques, et en particulier l'optimisation par essaim de particules (PSO), se sont imposées comme des solutions performantes pour la sélection dynamique des chefs de cluster.

Ce chapitre présente tout d'abord les principes fondamentaux de la méta-heuristique PSO et ses variantes, puis détaille le protocole SEP, largement utilisé pour le routage hiérarchique dans les réseaux hétérogènes. Enfin, il s'intéresse à l'algorithme BPSO, version binaire du PSO, particulièrement adaptée aux problèmes de sélection discrets comme l'élection des chefs de cluster. L'objectif est de comparer ces approches, d'analyser leurs mécanismes et de mettre en évidence leurs avantages respectifs dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil.

3.2 Notion de méta-heuristique :

3.2.1 Définition :

Le terme méta heuristique est issu de la concaténation de deux termes grecs : méta, qui signifie « au-delà » (ou « à un niveau supérieur ») et heuristique. Effectivement, ces algorithmes visent à être des approches universelles capables d'optimiser une multitude de problèmes distincts, sans exiger des modifications substantielles dans l'algorithme utilisé. Les métaheuristiques sont, en règle générale, non-déterministes, ce qui signifie qu'elles ne sont pas capables de trouver la solution optimale, et encore moins de prouver l'optimalité de la solution obtenue. [33]

3.3 Le protocole Stable Election Protocol (SEP) :

3.3.1 Définition :

Ce protocole a été proposé par Smaragdakis et al dans 2004, Il est dédié aux réseaux hétérogènes et considère deux niveaux : les nœuds normaux avec une énergie initiale, que nous symbolisons par E_0 ils sont souvent déployés loin de la station de base et peuvent consommer plus d'énergie lors du transfert de données vers la station de base.

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

Quant au deuxième niveau, nous entendons les nœuds avancés avec une énergie plus élevée et nous les symbolisons avec le symbole

$E_0(1+\alpha)$.SEP est un protocole LEACH qui a été développé pour acheminer le leader du groupe et assurer la stabilité du réseau. [34]

3.3.2 Principe de protocole SEP :

Dans un WSN, SEP utilise une méthode distribuée pour sélectionner les chefs de cluster en tenant compte du niveau d'énergie de chaque nœud du réseau de capteurs sans fil. Le chef de groupe est choisi à chaque tour. Les nœuds sont distribués dans une zone spécifique. Les nœuds sont à l'origine de la génération initiale des nombres 0 et 1. Finalement, ils sont mis en comparaison avec la valeur seuil. [38]

3.3.3 Formalisation de protocole SEP :

Le SEP offre une plus grande chance aux nœuds avancés pour devenir un CH par rapport aux nœuds normaux, en minimisant leur intervalle de sélection CH via les équations ci-dessous : [37]

$$P_{nrm} = \frac{p}{1 + \alpha \cdot F} \quad (5)$$

$$P_{adv} = \frac{p}{1 + \alpha \cdot F} (1 + \alpha) \quad (6)$$

P : C'est le pourcentage désiré de centres de regroupement.

F : la fraction des nœuds avancés

Les probabilités de choisir un nœud normal en tant que chef de cluster (CH) et de choisir un nœud avancé en tant que CH sont respectivement représentées par **P_{nrm}** et **P_{adv}**.

Donc, pour chaque nœud S, un nombre aléatoire entre 0 et 1 est produit. Si cette valeur inférieure en dessous du seuil prédéfini, ce nœud se transformera en CH par équation suivante [37] :

$$T_{nrm} = \begin{cases} \frac{P_{nrm}}{1 - P_{nrm} \left(r \bmod \frac{1}{P_{nrm}} \right)}, & \text{if } nrm \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{adv} = \begin{cases} \frac{P_{adv}}{1 - P_{adv} \left(r \bmod \frac{1}{P_{adv}} \right)}, & \text{if } adv \in G' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

r : represent le tour

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

G représente l'ensemble des nœuds normaux qui n'ont pas été choisis en tant que CH lors des derniers cycles $1/P_nrm$, tandis que G consiste en l'ensemble des nœuds avancés qui ne sont pas sélectionnés comme CH lors des derniers tours $1/P_adv$.

L'organigramme suivant décrit l'enchaînement de ces actions :

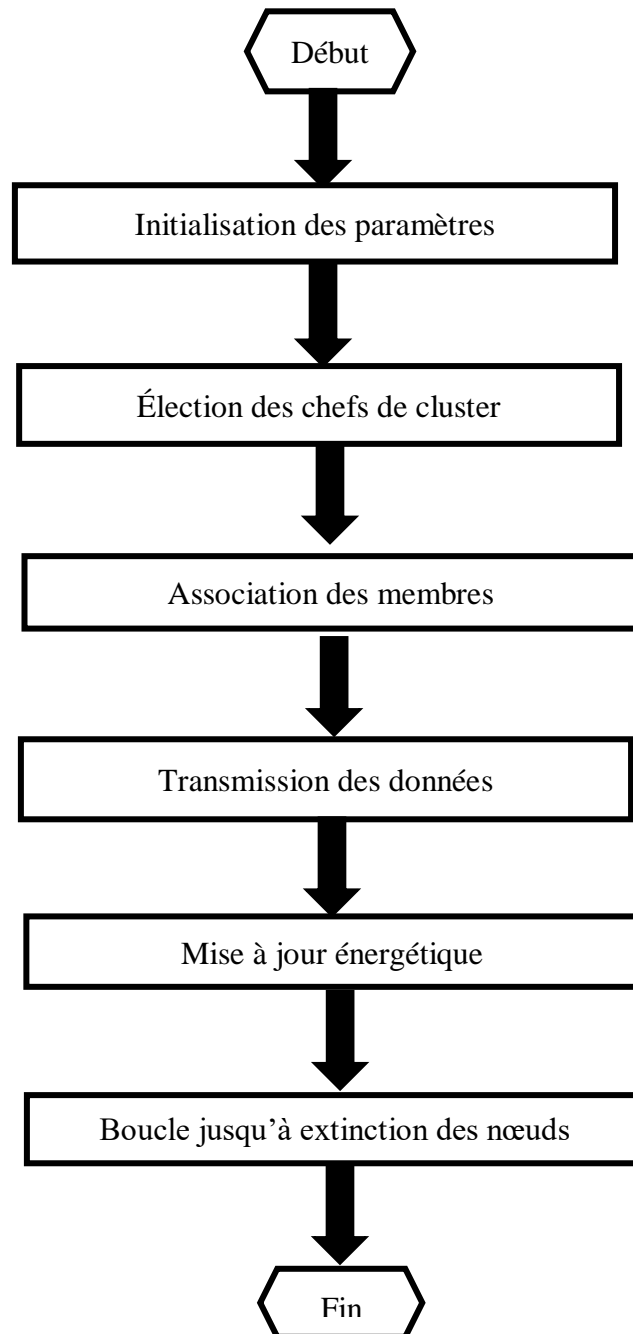


Figure 3.1 : organigramme SEP

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

ET algorithme de SEP comme suit : [34]

Algorithme 3 : SEP

1 : Initialiser les nœuds :

- Déployer aléatoirement n nœuds (normaux/avancés).
- Pour chaque nœud i :
 - Si "avancé" : $E(i) = E0 \times (1 + a)$
 - Sinon : $E(i) = E0$

2 : Pour chaque round r :

a. Initialiser les probabilités d'élection :

- $p_{nrm} = p / (1 + a \times m)$
- $p_{adv} = p \times (1 + a) / (1 + a \times m)$

b. Pour chaque nœud i (particule) :

3. Si nœud est vivant ($E(i) > 0$) :

4. Évaluer sa "condition physique" (probabilité d'élection) :

- Si nœud normal : $fitness = p_{nrm} \times (E(i) / E0)$
- Si nœud avancé : $fitness = p_{adv} \times (E(i) / (E0 \times (1 + a)))$

5. Générer $rand \in [0, 1]$

6. Si $rand < fitness$:

7. Élire comme chef de cluster (CH) $\rightarrow pos(i) = 1$

8. Mettre à jour $Pbest(i) = \max(Pbest(i), E(i))$

Sinon :

9. $Pos(i) = 0$ (nœud membre)

c. Mettre à jour $Gbest$:

10. Sélectionner le CH avec le $Pbest$ maximal $\rightarrow Gbest = \operatorname{argmax}(Pbest)$

d. Former les clusters :

11. Associer chaque nœud membre au CH le plus proche.

e. Transmettre les données :

12. Calculer la consommation d'énergie pour chaque transmission nœud \rightarrow CH ET CH \rightarrow sink.

f. Mettre à jour l'énergie résiduelle :

13. Pour chaque nœud i :

- $E(i) = E(i) - \text{énergie_consommée}$
- Si $E(i) \leq 0$: marquer comme mort.

3 : Répéter jusqu'à $r = r_{max}$ ou tous les nœuds morts.

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

3.4 Algorithme Particle Swarm Optimization (PSO) :

3.4.1 Origine :

La méthode d'Optimisation par essaim particulaire (OEP), connue sous le nom de Particle Swarm Optimization (PSO), a vu le jour en 1995 aux États-Unis. Au départ, Russel Eberhart et James Kennedy étaient les deux concepteurs, ils s'efforçaient de simuler des interactions sociales entre des « agents » visant un objectif spécifique dans un espace de recherche partagé, chaque agent possédant une certaine capacité à retenir et traiter l'information. Le principe fondamental était l'absence de chef d'orchestre, ni même une connaissance globale des informations par les membres, mais plutôt une expertise locale. Un modèle basique a donc été conçu. Dès les premières simulations, la dynamique collective de ces agents rappelait celle d'un essaim d'êtres vivants se dirigeant parfois en plusieurs sous-essaims vers des lieux d'intérêt. On observe ce comportement dans de nombreux autres modèles, clairement influencés par les systèmes naturels. La métaphore la plus appropriée ici pourrait être celle de la colonie d'abeilles, en particulier parce qu'une abeille ayant découvert un lieu prometteur peut communiquer cette information à certaines de ses congénères, qui tiendront compte de cette donnée pour leurs futurs déplacements. [36]

3.4.2 Principe de l'algorithme :

L'OEP (Optimisation par Essaim particulaire) est une méthode de recherche populationnelle où les entités, appelées particules, sont rassemblées au sein d'un essaim. Chaque élément de l'essaim constitue une proposition de solution au problème d'optimisation. Dans un système OEP, chaque particule est « guidée » dans l'espace de recherche multidimensionnel, modifiant sa position dans cet espace en se basant sur son expérience personnelle et celle des particules adjacentes. Ainsi, une particule utilise la meilleure position générée par elle et ses voisins pour se diriger vers une solution optimale [36]

Chaque particule possède : [37]

- Une position : Autrement dit, il s'agit de ses coordonnées dans le domaine de définition.
- Une vitesse : qui autorise le mouvement de la particule.

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

- Un voisinage : Autrement dit, un groupe de particules qui agissent directement sur la particule.

3.4.3 Formalisation :

La version standard de la PSO peut être aisément formalisée et codée, L'espace de recherche est de dimension D. La position courante d'une particule dans cet espace à l'instant t est influencée par plusieurs facteurs :

- le nombre de particules de l'essaim,
- la vitesse maximale des particules,
- la topologie,
- la taille du voisinage d'une particule,
- l'inertie d'une particule,
- les coefficients de confiance.

La particule se déplacera entre les itérations t et t+1, en fonction de sa vitesse et des deux positions les plus connues, qui sont la sienne et celles de l'essaim, et cela se traduit selon les deux équations suivantes : [38]

$$vid(t) = vid(t-1) + c1 r1 (pbestid(t-1) - xid(t-1)) + c2 r2 (gbestd(t-1) - xid(t-1)) \quad (1)$$

$$xid(t) = xid(t-1) + vid(t) \quad (2)$$

Nous allons expliquer chaque symbole dans l'équation :

$xid(t), xid(t-1)$: Les positions de la particule i en dimension d aux instants t et t-1 respectivement.

$vid(t), vid(t-1)$: Les vitesses de la particule i en dimension d aux instants t et t-1, respectivement

$pbestid(t-1)$: La position optimale atteinte par la particule i dans une dimension d à l'instant t-1.

$gbestd(t-1)$: La position optimale atteinte par l'essaim dans la dimension d au moment t-1.

$c1, c2$: Deux variables fixes, représentant les coefficients d'accélération.

$r1, r2$: Des nombres aléatoires sélectionnés dans l'intervalle [0,1].

3.4.4 Algorithme de base :

L'algorithme PSO démarre par l'initialisation de la taille de l'essaim et des données de base. A chaque particule est ensuite attribuée une position et une vitesse initiales et il s'agit, aussi d'initialiser les (pbest). À l'étape suivante, l'algorithme va calculer les

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

fitness des particules afin de trouver la meilleure position de l'essaim (gbest). Lors de chaque itération du processus de recherche, les particules se déplacent conformément aux équations (1), leurs fitness sont calculées et actualisées. On répète le processus jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. [37]

L'organigramme ci-dessous décrit ce processus :

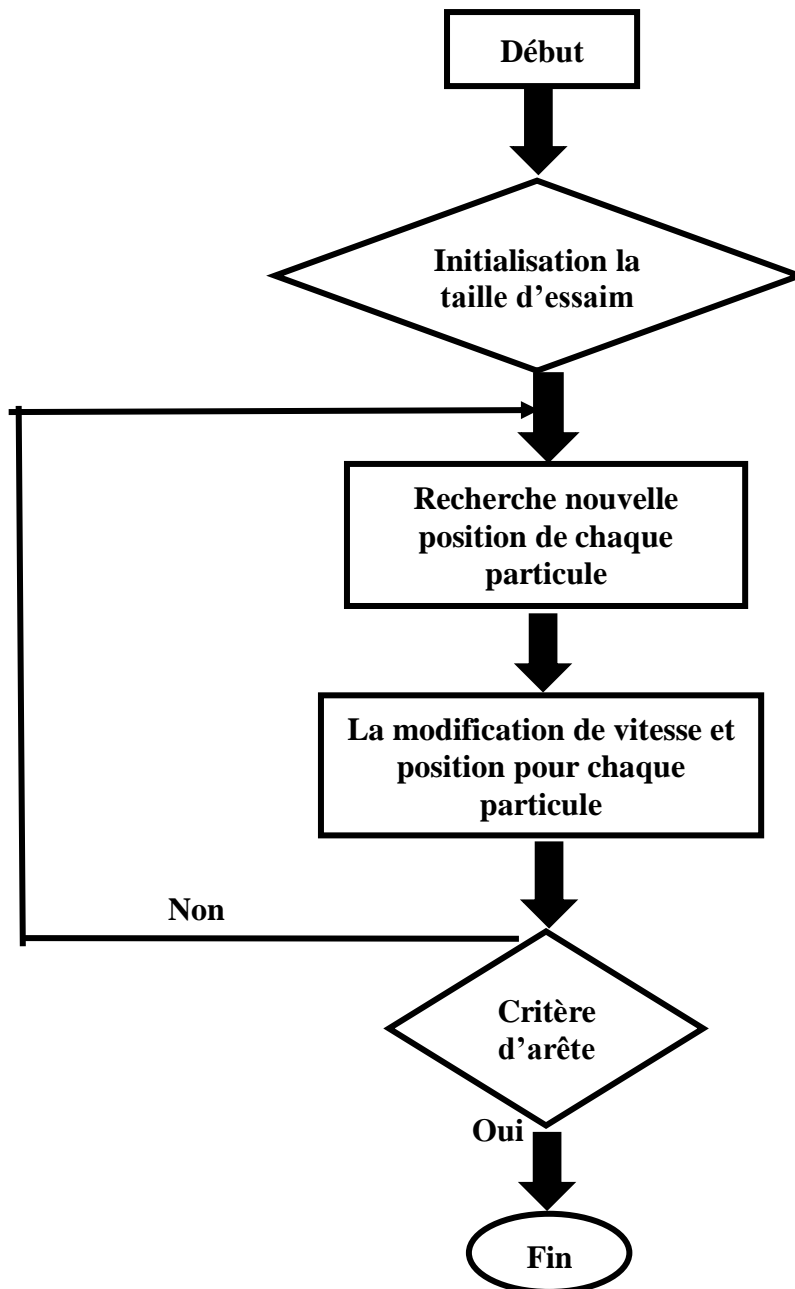


Figure 3.2 : organigramme PSO [37]

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

Et algorithme de PSO comme suit :

Algorithme 1 : PSO

1 : *Début*

2 : *Initialiser les paramètres et la taille M de l'essaim ;*

3 : *Initialiser aléatoirement les vitesses et les positions des particules dans chaque dimension de l'espace de recherche ;*

4 : **Pour** chaque particule, $pbestid = xid$;

5 : *Calculer $f(xid)$ pour chaque particule ;*

6 : *Calculer $gbestd$; // la meilleure $pbestid$*

7 : **Tant que** (la condition d'arrêt n'est pas vérifiée) **faire**

8 : **Pour** ($i = 1$ à M) **faire**

9 : *Calculer la nouvelle vitesse en utilisant l'équation (1) ;*

10 : *Trouver la nouvelle position en utilisant l'équation (2) ;*

11 : *Calculer $f(xid)$ pour chaque particule ;*

12 : **Si** ($f(xid)$ est meilleure que $f(pbestid)$) **alors**

$pbestid = xid$;

13 : **Si** ($f(pbestid)$ est meilleure que $f(gbestd)$) **alors** $gbestd = pbestid$;

14 : *Fin pour*

15 : *Fin tant que*

16 : *Afficher (la meilleure solution trouvée est $gbestd$) ;*

17 : *Fin*

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

3.5 La méthode d'optimisation par essaim de particules binaires (BPSO) :

3.5.1 Origine :

L'algorithme standard de l'optimisation par essaim de particules en version discrète/binaire, connu sous le nom de BPSO, a été initialement présenté en 1997 par Kennedy et Eberhart [Kennedy et Eberhart, 1997]. Dans l'algorithme BPSO (pour Binary Particle Swarm Optimization en anglais), la position de la particule i est symbolisée par une série de bits. [38]

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules binaires (BPSO) est une version modifiée de l'algorithme PSO, spécifiquement conçu pour traiter les problèmes binaires. [37]

3.5.2 Principe de l'algorithme :

Dans l'algorithme BPSO, on utilise des valeurs binaires pour initialiser les particules de manière aléatoire. Avant la mise à jour de leurs positions, une fonction sigmoïde est appliquée aux valeurs des vitesses pour les convertir en un intervalle binaire. [34]

3.5.3 Fonctionnement de l'algorithme :

Les étapes suivantes décrivent ce processus :

- **Initialisation :**

Créer un groupe de particules à partir de positions binaires aléatoires (vecteurs de 0 et 1) et une vitesse de chaque particule qui représente la probabilité de changer de l'état 0 vers 1 et inversement.

- **Mise à jour la vitesse :**

L'équation (3) suivante formule la mise à jour de la vitesse [34]

$$V(P, d) = w \cdot V(P, d) + C_1 \cdot r_1 (Pbest(P, d) - pos(P, d)) + C_2 \cdot r_2 (Gbest(p, d) - pos(P, d)) \quad (3)$$

w : le poids d'inertie

c_1, c_2 : coefficients d'accélération

r_1, r_2 : nombres aléatoires entre 0 et 1

Pbest : meilleure position personnelle de la particule

Gbest : meilleure position globale trouvée par l'essaim

pos (P, d) : correspond à la position de la particule P en dimension d, tandis que V (P, d) représente sa vitesse (la fonction Vitesse).

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

- **Transformation la vitesse en probabilité :**

On normalise par la suite la vitesse des particules en binaire à l'aide de la fonction sigmoïde, comme illustré ci-dessous. [37]

$$\text{Sig}(v_{id}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}}}$$

Sig (v-id) : indique la probabilité que le bit xid ait une valeur égale à 1

- **Mise à jour la position :**

La position est calculée selon l'équation (4) suivante [37] :

$$x_{id} = \begin{cases} 1, & \text{si } r < \text{Sig}(v - id) \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases} \quad (4)$$

L'organigramme suivant décrit l'enchaînement de ces actions :

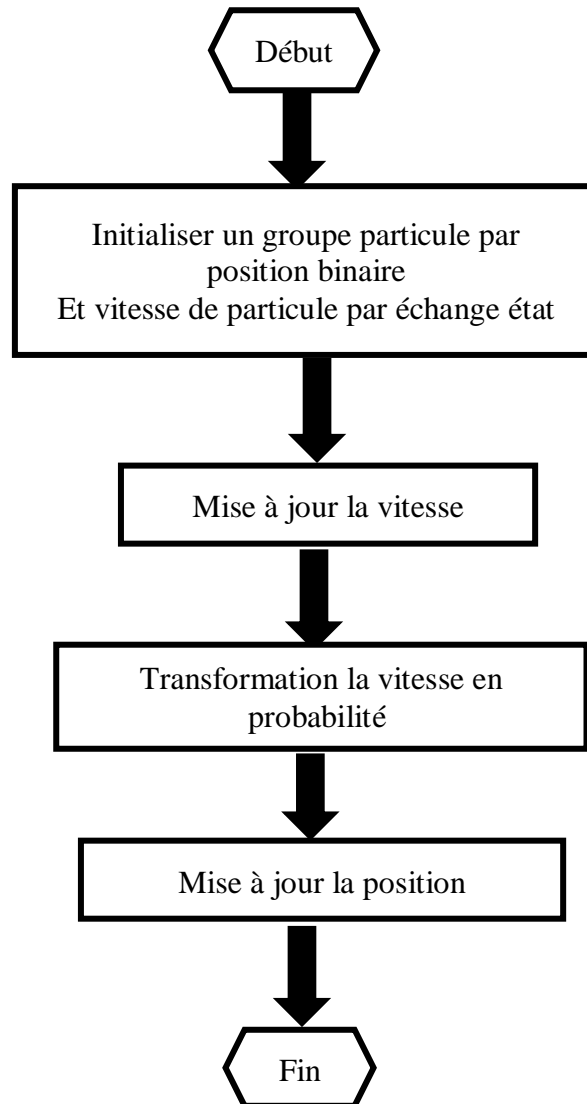


Figure 3.3 : organigramme BPSO

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

Et algorithme de BPSO comme suit : [34]

Algorithme 2 : BPSO

1 : *Initialiser les particules (pos (:)) et leur vitesse*

2 : *À chaque itération, faire*

3 : **Pour** chaque particule p , **faire**

4 : *Évaluer sa condition physique*

5 : *Mettre à jour son Pbest*

6 : **Si** condition physique (pos (P)) > Condition physique (Pbest (P)) **alors**

7 : $Pbest (P) = pos (P)$

8 : $Condition\ physique (Pbest (P)) = Condition\ physique (pos (P))$

9 : **Fin si**

10 : *Mettre à jour le Gbest alors*

11 : **Si** $Pbest (P) > Gbest$ **alors**

12 : $Gbest = Pbest (P)$

13 : $Meilleure\ condition\ physique = Condition\ physique (Pbest (P))$

14 : **Fin si**

Fin pour chaque particule

Mettre à jour la vitesse des particules

Mettre à jour la position des particules à l'aide de la sigmoïde

3.6 Fonction de fitness :

3.6.1 Définition :

La fonction de fitness est une fonction mathématique utilisée dans les algorithmes d'optimisation (comme PSO ou BPSO) pour évaluer la qualité d'une solution candidate. Elle attribue un score (appelé fitness) à chaque solution, que l'algorithme cherche à minimiser ou maximiser selon le problème [38].

Dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, cette fonction est souvent définie comme la consommation énergétique totale du réseau pour une configuration donnée des chefs de cluster [16].

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

3.6.2 Objectif de la fonction de fitness :

- Évaluer la consommation énergétique totale du réseau pour une configuration donnée des chefs de cluster (CH).
- Une bonne solution est celle qui minimise cette consommation, donc la fonction de fitness doit retourner une valeur faible pour les configurations efficaces.

3.6.3 Expression de la fonction de fitness utilisée :

Soit :

- **pos** : vecteur binaire de taille n (nombre de nœuds), où **pos(i)=1** signifie que le nœud i est chef de cluster, sinon 0.
- **S(i).E**: énergie résiduelle du nœud i.
- **S(i).xd,S(i).yd**: coordonnées du nœud i.
- **sink.x,sink.y** : coordonnées de la station de base.
- **do** : distance seuil.
- **ETX,EDA,Emp,Efs,ERX**: paramètres énergétiques du modèle.

La fonction de fitness calcule :

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^n \text{coût énergétique du nœud } i$$

avec :

Si i est un chef de cluster :

$$\text{coût}_i = \begin{cases} (ETX + EDA) \times l + Emp \times l \text{ si } d_{i,sink}^4 & \text{si } d_{i,sink} > do \\ (ETX + EDA) \times l \text{ et } -Efs \times l \times d_{i,sink}^2 & \text{sinon} \end{cases}$$

Sinon (nœud normal) :

coût_i = émission vers le CH le plus proche + coût réception par le CH

Avec l la taille du paquet et d_i, CH la distance au chef de cluster le plus proche.

Chapitre 03 : la méta-heuristique PSO, BPSO et le protocole SEP

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté de trois types d'algorithmes d'optimisation, de leurs principes et de leur méthode. Le chapitre suivant sera consacré à l'implémentation de ces algorithmes et à leur comparaison.



**Chapitre 4 :
L'implémentation des
protocoles SEP, PSO et BPSO**

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.1 Introduction :

Le rôle fondamental d'un protocole de routage dans un réseau de capteurs sans fil consiste à garantir l'acheminement optimal et fiable des données entre les différents nœuds et la station de base, tout en minimisant la consommation énergétique afin de prolonger la durée de vie du réseau. Pour atteindre cet objectif, de nombreux protocoles et algorithmes d'optimisation ont été développés, visant à sélectionner les chemins les plus efficaces ou à désigner les chefs de cluster les mieux adaptés pour relayer les messages à travers le réseau.

Dans ce chapitre, nous présentons l'implémentation de trois protocoles majeurs : SEP, PSO et BPSO. Le protocole SEP repose sur une sélection probabiliste des chefs de cluster dans un réseau hétérogène, tandis que les algorithmes PSO et BPSO, inspirés de l'intelligence en essaim, permettent d'optimiser la sélection des chefs de cluster ou des routes à l'aide de techniques d'optimisation.

4.2 Outils et environnement de développement : MATLAB R2014a :

4.2.1 Présentation de MATLAB R2014a :

Pour la réalisation de ce travail, l'environnement de développement choisi est MATLAB R2014a. MATLAB (Matrix Laboratory) est un logiciel de calcul numérique et de simulation largement utilisé dans le domaine scientifique et technique, notamment pour la modélisation, la simulation, l'analyse de données et le développement d'algorithmes. La version 2014 de MATLAB offre une interface conviviale, de puissantes capacités de traitement matriciel et un ensemble complet de bibliothèques adaptées à la simulation de réseaux de capteurs sans fil (WSN).

4.2.2 Raisons du choix de MATLAB R2014a :

L'utilisation de MATLAB R2014a pour ce projet se justifie par plusieurs avantages :

- **Facilité de modélisation et de manipulation des données :** MATLAB permet de représenter facilement la topologie du réseau, les positions des nœuds, les tables de routage et l'évolution de l'énergie sous forme de matrices et de vecteurs.
- **Richesse des bibliothèques et fonctions intégrées :** MATLAB propose de nombreuses fonctions mathématiques, statistiques et d'optimisation, facilitant

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

l'implémentation des algorithmes PSO et BPSO, ainsi que la gestion des processus aléatoires nécessaires à la simulation.

- **Visualisation avancée :** Grâce à ses outils graphiques, MATLAB permet de visualiser la distribution des nœuds, la formation des clusters, l'évolution de la consommation énergétique et les résultats de simulation sous forme de graphiques et d'animations.
- **Reproductibilité et flexibilité :** Les scripts MATLAB sont facilement modifiables et reproductibles, ce qui permet de tester différents scénarios (variation du nombre de nœuds, de l'énergie initiale, des paramètres d'optimisation, etc.) et d'assurer la fiabilité des résultats.
- **Communauté et documentation :** MATLAB bénéficie d'une large communauté d'utilisateurs et d'une documentation riche, facilitant la résolution des problèmes rencontrés lors du développement.

4.2.3 Architecture proposée pour la simulation :

L'architecture de la simulation proposée dans MATLAB R2014a se compose généralement des modules suivants :

- **Génération de la topologie du réseau :** Placement aléatoire ou déterministe des nœuds dans une aire de simulation définie.
- **Initialisation des paramètres :** Définition de l'énergie initiale des nœuds, des distances, des seuils de sélection des chefs de cluster, etc.
- **Implémentation des protocoles :**

SEP : Sélection probabiliste des chefs de cluster selon l'hétérogénéité énergétique.

PSO : Application de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules pour la sélection des chefs de cluster ou des routes.

BPSO : Adaptation de l'algorithme PSO en version binaire pour la sélection optimale des chefs de cluster.

- **Gestion des communications :** Simulation de l'envoi de données entre les nœuds, les chefs de cluster et la station de base, avec calcul de la consommation énergétique à chaque étape.
- **Collecte et analyse des résultats :** Enregistrement des métriques de performance (durée de vie du réseau, nombre de paquets transmis, stabilité, etc.) et génération de graphiques comparatifs.

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.3 Protocole SEP : Implémentation et détails :

4.3.1 Description du protocole SEP :

Le protocole SEP (Stable Election Protocol) est conçu pour les réseaux de capteurs sans fil hétérogènes où deux types de nœuds coexistent : les nœuds normaux et les nœuds avancés, ces derniers disposant d'une énergie initiale supérieure. SEP vise à prolonger la durée de vie du réseau en attribuant une probabilité plus élevée aux nœuds avancés pour devenir chefs de cluster (CH), ce qui permet une meilleure répartition de la consommation énergétique.

4.3.2 Structure du code et organisation des modules :

Notre code MATLAB est organisé en plusieurs sections :

- **Paramétrage** : Définition du constant énergétique réseau et du pourcentage de nœuds avancés.
- **Initialisation** : Placement aléatoire des nœuds, attribution de l'énergie et du type (normal/avancé).
- **Boucle principale (simulation des rounds)** :
 - Calcul des probabilités d'élection.
 - Réinitialisation des compteurs d'élection.
 - Comptage des nœuds morts et de la consommation d'énergie.
 - Élection des chefs de cluster (différenciée selon le type de nœud).
 - Association des nœuds à leur chef de cluster le plus proche.
 - Calcul de la consommation énergétique pour chaque transmission.
- **Affichage des résultats** : Visualisation de la topologie, évolution du nombre de nœuds morts, consommation d'énergie, et paquets transmis à la station de base.

4.3.3 Modélisation des nœuds hétérogènes (normaux et avancés) :

Dans le code, chaque nœud est initialisé avec des coordonnées aléatoires dans un champ de $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$.

Les nœuds normaux reçoivent une énergie initiale E_0 .

Les nœuds avancés (10 % des nœuds, selon le paramètre m) reçoivent une énergie initiale $E_0 \cdot (1+a)$, où a est le facteur d'énergie supplémentaire (**ici, $a = 1$**).

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

```
% Création du réseau de capteurs aléatoire
]for i = 1:n
    S(i).xd = rand * xm;
    S(i).yd = rand * ym;
    S(i).G = 0;           % Pas encore chef de cluster
    S(i).type = 'N';     % Par défaut, normal

    if i > m*n
        S(i).E = Eo;           % Nœud normal
        S(i).ENERGY = 0;
    else
        S(i).E = Eo * (1+a);   % Nœud avancé
        S(i).ENERGY = 1;
    end
end
end
```

Figure 4.1 – Extrait du code de la modélisation des nœuds hétérogènes

4.3.4 Calcul des probabilités de sélection des CH (Chefs de Cluster) :

SEP ajuste la probabilité de devenir chef de cluster selon le type du nœud :

Pour un nœud normal : $p_{nrm} = p / (1 + a*m)$;

Pour un nœud avancé : $p_{adv} = p*(1+a) / (1 + a*m)$;

Cela permet d'augmenter la fréquence de sélection des nœuds avancés comme CH, équilibrant ainsi la consommation d'énergie.

```
for r = 0:rmax
    % Probabilités d'élection
    pnmr = p / (1 + a*m);
    padv = p*(1+a) / (1 + a*m);

    % Remise à zéro des compteurs d'élection
    if mod(r, round(1/pnmr)) == 0
        for i = 1:n
            S(i).G = 0;
        end
    end
    if mod(r, round(1/padv)) == 0
        for i = 1:n
            if S(i).ENERGY == 1
                S(i).G = 0;
            end
        end
    end
end
```

Figure 4.2 – Extrait du code du calcul des probabilités de sélection des CH

4.3.5 Association aux clusters :

Chaque nœud non-CH vivant :

- Cherche le CH le plus proche.
- Transmet ses données à ce CH (calcul de la dépense énergétique).
- Le CH reçoit et agrège les données (dépense énergétique supplémentaire).

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

```
% Association des nœuds normaux à un chef de cluster
for i = 1:n
    if S(i).type == 'N' && S(i).E > 0 && (cluster-1) >= 1
        min_dis = sqrt((S(i).xd - sink.x)^2 + (S(i).yd - sink.y)^2);
        min_dis_cluster = 1;
        for c = 1:cluster-1
            temp = sqrt((S(i).xd - C(c).xd)^2 + (S(i).yd - C(c).yd)^2);
            if temp < min_dis
                min_dis = temp;
                min_dis_cluster = c;
            end
        end
        end
        % Transmission vers le chef de cluster
        if min_dis > do
            S(i).E = S(i).E - (ETX*4000 + Emp*4000*min_dis^4);
        else
            S(i).E = S(i).E - (ETX*4000 + Efs*4000*min_dis^2);
        end
        % Réception par le chef de cluster
        if min_dis > 0
            S(C(min_dis_cluster).id).E = S(C(min_dis_cluster).id).E - ((ERX + EDA)*4000);
        end
    end
end
```

Figure 4.3 – Extrait du code d'association aux clusters

4.3.6 Pseudocode de l'implémentation de SEP en MATLAB :

Algorithme SEP

début

Initialiser les paramètres et les nœuds

Pour chaque round de 1 à rmax

 Calculer p_{nm} et p_{adv}

 Réinitialiser les compteurs d'élection si nécessaire

 Compter les nœuds morts et l'énergie consommée

 Si premier nœud mort, enregistrer le round

 Pour chaque nœud vivant

 Si conditions remplies, élire comme chef de cluster (CH)

 Calculer l'énergie consommée pour la transmission vers le sink

 Fin

 Pour chaque nœud non-CH vivant

 Trouver le CH le plus proche

 Transmettre les données au CH

 Calculer l'énergie consommée pour l'émission et la réception

 Fin

Fin

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.4 Protocole SEP optimisé par PSO : Implémentation et Détails :

4.4.1 Principes fondamentaux de l'algorithme PSO :

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) est une méthode d'optimisation inspirée du comportement collectif des essaims. Chaque solution potentielle est appelée particule. Les particules évoluent dans l'espace des solutions en mettant à jour leur position et vitesse, guidées par leur meilleure solution individuelle (pbest) et la meilleure solution globale (gbest).

4.4.2 Structure du code et organisation des modules :

Notre code SEP+PSO est organisé en plusieurs sections clés, répétées à chaque round :

- **Initialisation du réseau** : positionnement aléatoire des nœuds, assignation d'énergie initiale.
- **Initialisation des particules PSO** :
- Chaque particule a une position (vecteur de valeurs continues entre 0 et 1) et une vitesse.
- La position est binarisée pour décider si un nœud est CH (position > 0.9).
- **Boucle d'optimisation PSO (nombre limité d'itérations)** :
- Calcul de la fonction fitness pour chaque particule (somme des distances minimales entre chaque nœud et son CH).
- Mise à jour des meilleures positions individuelles (pbest) et globale (gbest).
- Mise à jour des vitesses et positions des particules selon la formule PSO.
- Sélection finale des chefs de cluster selon la meilleure particule (gbest).
- Association des nœuds aux CH les plus proches.
- **Simulation des transmissions** : calcul de la consommation énergétique selon la distance et mise à jour de l'énergie résiduelle.
- **Affichage de la topologie** du réseau à chaque round.
- **Collecte de statistiques** sur les nœuds morts, consommation d'énergie, et paquets envoyés.

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.4.3 Initialisation des particules PSO :

Chaque particule est un vecteur binaire de taille n (nombre de nœuds), généré aléatoirement:

```
% Initialisation des particules
for i = 1:swarm_size
    particle(i).position = randi([0,1],1,n);
    particle(i).velocity = zeros(1,n);
    particle(i).best_position = particle(i).position;
    particle(i).best_fitness = inf;
end
```

Figure 4.4 – Extrait du code d'initialisation des particules(PSO)

4.4.4 Fonction fitness :

La fitness d'une particule est la somme des distances minimales entre chaque nœud et son CH le plus proche. Cette fonction favorise une meilleure couverture et réduit la consommation énergétique liée aux transmissions.

```
function fit = fitness_function(pos, S, sink, do, ETX, EDA, Emp, Efs, ERX)
% pos : vecteur binaire indiquant quels nœuds sont CH (1) ou non (0)
n = length(pos);
ch_indices = find(pos == 1);

if isempty(ch_indices)
    fit = inf; % pénalité si aucun CH sélectionné
    return;
end

total_energy_cost = 0;
for i = 1:n
    if S(i).E <= 0
        total_energy_cost = total_energy_cost + 1e6; % pénalité nœud mort
        continue;
    end

    if pos(i) == 1
        % Coût énergie pour CH vers sink
        dist = sqrt((S(i).xd - sink.x)^2 + (S(i).yd - sink.y)^2);
        if dist > do
            cost = (ETX + EDA)*4000 + Emp*4000*dist^4;
        else
            cost = (ETX + EDA)*4000 + Efs*4000*dist^2;
        end
    end
end
```

Figure 4.5 – Extrait du code de la fonction fitness

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.4.5 Mise à jour des vitesses et positions :

Les vitesses sont mises à jour selon la formule PSO classique, puis converties en probabilités via la fonction sigmoïde pour obtenir la nouvelle position binaire de chaque particule:

```
for i = 1:swarm_size
    r1 = rand(1,n);
    r2 = rand(1,n);
    particle(i).velocity = w*particle(i).velocity ...
        + c1*r1.*(particle(i).best_position - particle(i).position) ...
        + c2*r2.*(global_best_position - particle(i).position);

    prob = sigmoid(particle(i).velocity);
    particle(i).position = double(rand(1,n) < prob);
end
end
```

Figure 4.6 – Extrait du code du Mise à jour des vitesses et positions

4.4.6 Adaptations spécifiques pour les réseaux de capteurs sans fil :

- Binarisation de la position :

La position continue des particules est transformée en binaire via un seuil (ici 0.9) pour décider si un nœud est CH. Cela correspond à une adaptation du PSO classique vers une version discrète.

- Limitation du nombre de CH :

La condition $\text{length}(\text{ch_idx}) > n * p * 2$ empêche la sélection d'un nombre excessif de CH, ce qui pourrait augmenter inutilement la consommation énergétique.

- Fonction fitness basée sur la distance :

Utiliser la somme des distances minimales favorise la proximité des membres vis-à-vis de leur CH, réduisant la dépense énergétique.

- Modélisation énergétique réaliste :

La consommation d'énergie est calculée selon la distance et les modèles de propagation free space et multi-path, ce qui reflète bien la réalité physique.

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

- Affichage dynamique :

La topologie est affichée à chaque round avec des symboles distincts pour les CH, les nœuds normaux et les nœuds morts, facilitant la visualisation de l'évolution du réseau.

4.4.7 Pseudocode de l'implémentation de PSO :

Initialiser les positions et vitesses des particules (aléatoires dans [0,1])

Algorithme PSO

début

Pour chaque round :

Pour chaque itération PSO :

Pour chaque particule :

Binariser la position (CH si > 0.9)

Si aucun CH ou trop de CH : fitness = Inf

Sinon : fitness = somme des distances nœud-CH les plus proches

Mettre à jour le meilleur personnel (pbest)

Mettre à jour le meilleur global (gbest)

Fin

Mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule

Fin

Les CH sont les nœuds avec gbest > 0.9

Associer chaque nœud à son CH le plus proche

Mettre à jour l'énergie des nœuds selon la transmission et la réception

Fin

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.5 Protocole SEP optimisé par BPSO : Implémentation et détails :

4.5.1 Présentation de l'algorithme BPSO et de ses différences avec PSO :

L'algorithme Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) est une variante du PSO classique adaptée aux problèmes où les variables de décision sont binaires (0 ou 1). Contrairement au PSO standard qui évolue dans un espace continu, BPSO manipule des vecteurs binaires représentant des solutions combinatoires, ici la sélection des chefs de cluster (CH) dans un réseau de capteurs.

Dans BPSO, la vitesse d'une particule est interprétée comme une probabilité que chaque bit change d'état. La mise à jour des positions utilise une fonction sigmoïde appliquée aux vitesses, puis un tirage aléatoire pour décider si un bit passe de 0 à 1 ou inversement. Ce mécanisme permet d'explorer efficacement l'espace binaire des solutions.

4.5.2 Structure du code et organisation des modules :

Notre code SEP+BPSO est organisé comme suit :

- **Initialisation du réseau :**
 - Positionnement aléatoire des nœuds dans un champ 2D.
 - Attribution de l'énergie initiale.
- **Initialisation des particules BPSO :**
 - Génération de positions binaires aléatoires (1 = CH, 0 = nœud normal).
 - Initialisation des vitesses à zéro.
- **Boucle d'optimisation BPSO (nombre d'itérations fixé) :**
 - Évaluation de la fitness de chaque particule (somme des distances minimales entre chaque nœud et son CH).
 - Mise à jour des meilleures positions individuelles (pbest) et globale (gbest).
 - Mise à jour des vitesses selon la formule PSO classique.
 - Application de la fonction sigmoïde sur les vitesses.
 - Mise à jour des positions binaires par comparaison avec un seuil aléatoire.
- **Sélection finale des chefs de cluster** selon la meilleure particule (gbest).
- **Association des nœuds** aux CH les plus proches.

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

- Simulation des transmissions :

- Calcul de la consommation énergétique pour les transmissions **nœud**→**CH** et **CH**→**Sink**.

- Mise à jour de l'énergie résiduelle.

- Affichage de la topologie à chaque round :

- Nœuds morts en rouge, CH en noir, nœuds normaux en bleu.
- Collecte et affichage des statistiques : nombre de nœuds morts, consommation d'énergie, paquets transmis.

4.5.3 Initialisation des particules BPSO :

Chaque particule est un vecteur binaire aléatoire de taille n:

```
% Initialisation des particules
for i = 1:swarm_size
    particle(i).position = randi([0,1],1,n);
    particle(i).velocity = zeros(1,n);
    particle(i).best_position = particle(i).position;
    particle(i).best_fitness = inf;
end
```

Figure 4.7 – Extrait du code d'initialisation des particules (BPSO)

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.5.4 Calcul de la fitness :

La fitness est la somme de la consommation énergétique totale pour la configuration de CH proposée:

```
function fit = fitness_function(pos, S, sink, do, ETX, EDA, Emp, Efs, ERX)
    % pos : vecteur binaire indiquant quels nœuds sont CH (1) ou non (0)
    n = length(pos);
    ch_indices = find(pos == 1);

    if isempty(ch_indices)
        fit = inf; % pénalité si aucun CH sélectionné
        return;
    end

    total_energy_cost = 0;
    for i = 1:n
        if S(i).E <= 0
            total_energy_cost = total_energy_cost + 1e6; % pénalité nœud mort
            continue;
        end

        if pos(i) == 1
            % Coût énergie pour CH vers sink
            dist = sqrt((S(i).xd - sink.x)^2 + (S(i).yd - sink.y)^2);
            if dist > do
                cost = (ETX + EDA)*4000 + Emp*4000*dist^4;
            else
                cost = (ETX + EDA)*4000 + Efs*4000*dist^2;
            end
        end
    end
end
```

Figure 4.8 – Extrait du code du fonction fitness (BPSO)

4.5.5 Mise à jour des vitesses et positions :

Les vitesses sont mises à jour selon la formule PSO, puis transformées en probabilités par la fonction sigmoïde pour générer la nouvelle position binaire:

```
for i = 1:swarm_size
    r1 = rand(1,n);
    r2 = rand(1,n);
    particle(i).velocity = w*particle(i).velocity ...
        + c1*r1.*(particle(i).best_position - particle(i).position) ...
        + c2*r2.*(global_best_position - particle(i).position);

    prob = sigmoid(particle(i).velocity);
    particle(i).position = double(rand(1,n) < prob);
end
end
```

Figure 4.9 – Extrait du code du Mise à jour des vitesses et positions (BPSO)

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.5.6 Points particuliers de l'implémentation binaire :

- **Représentation binaire** : Chaque particule encode la sélection des CH par un vecteur de bits, ce qui est naturel pour ce type de problème.
- **Fonction sigmoïde** : Elle transforme la vitesse en probabilité, permettant une mise à jour stochastique des bits.
- **Pénalisation des solutions non-valides** : Les particules avec trop peu ou trop de CH sont pénalisées par une fitness infinie, guidant la recherche vers des solutions valides.
- **Gestion énergétique réaliste** : La consommation d'énergie est calculée selon les distances et les modèles de propagation free-space et multi-path.
- **Visualisation dynamique** : La topologie du réseau est affichée à chaque round, facilitant l'analyse visuelle de la dynamique du protocole.

4.5.7 Pseudocode de l'implémentation de BPSO :

Algorithme BPSO

```
Initialiser positions et vitesses des particules (aléatoires dans [0,1])
Pour chaque round r de 0 à rmax faire
  Pour chaque itération PSO de 1 à nb_itérations faire
    Pour chaque particule p de 1 à nb_particules faire
      Binariser la position :
        CH si position > 0.9, sinon nœud normal
      Si aucun CH sélectionné ou trop de CH alors
        fitness ← Inf // pénalité
      Sinon
        fitness ← somme des distances entre chaque nœud et son CH le plus proche
      FinSi
      Mettre à jour le meilleur personnel (pbest) si fitness améliorée
      Mettre à jour le meilleur global (gbest) si fitness améliorée
    FinPour
    Mettre à jour la vitesse de chaque particule selon la formule PSO
    Appliquer la fonction sigmoïde sur la vitesse
    Mettre à jour la position binaire selon la probabilité sigmoïde
  FinPour
  Déterminer les CH : nœuds avec gbest > 0.9
  Pour chaque nœud
    Associer au CH le plus proche
  FinPour
  Mettre à jour l'énergie des nœuds en fonction des transmissions et réceptions
FinPour
```

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

4.6 Evaluation des performances:

4.6.1 Paramètres initiaux:

Paramètre	Valeur
Les coordonnées du sink	Sink.x=50, Sink.y=50
Nombre des nœuds	50 et puis 100
Energie initiale de chaque noeud	0.5
Eelec (energie du circuit électronique)	$50 \cdot 10^{-9}$
Emp (énergie d'amplificateur)	$100 \cdot 10^{-12}$
EDA (énergie d'agrégation)	$5 \cdot 10^{-9}$
K(taille d'un paquet de données)	4000

Table 4-1. parametres du réseau.

Paramètre	Valeur
Nombre de particules	20
C1=C2	1.49
W(le poids d'inertie)	0.78
Les limites de la vitesse	[-5, 5]

Table 4-2 parameters du BPSO

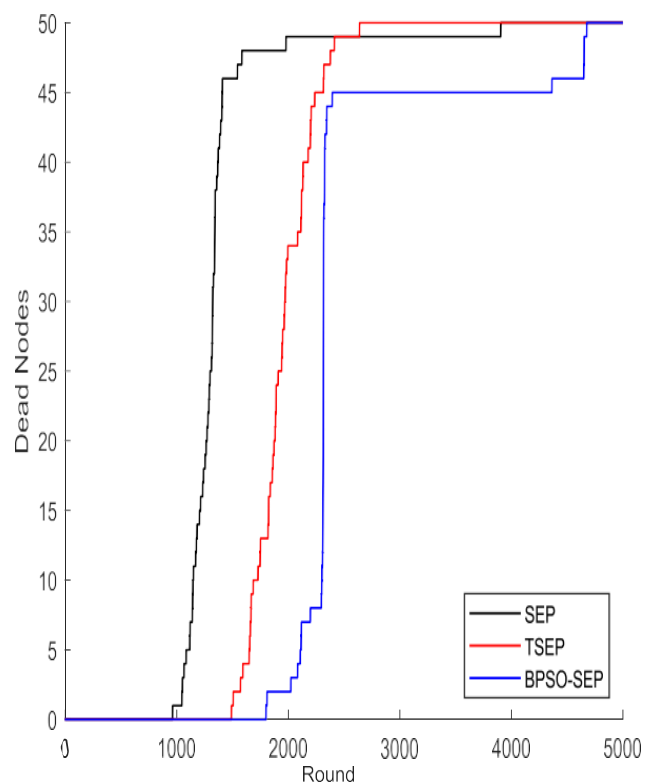
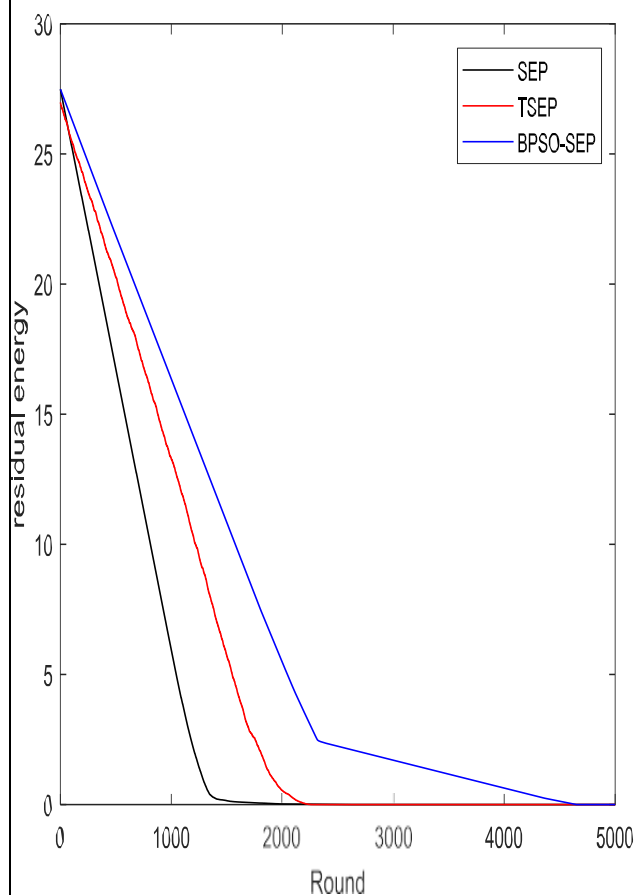
Ci-dessous est l'ensemble des courbes comparatifs entre SEP, TSEP et BPSO-SEP en terme de l'énergie résiduelle, le nombre de nœuds deals et le nombre de paquets délivrés à la SB au cours des rounds.

Courbetcomparatives (SEP TSEP& BPSO-SEP)

Expérience 1 : 50 nœuds dans une zone de détection 100*100 m2

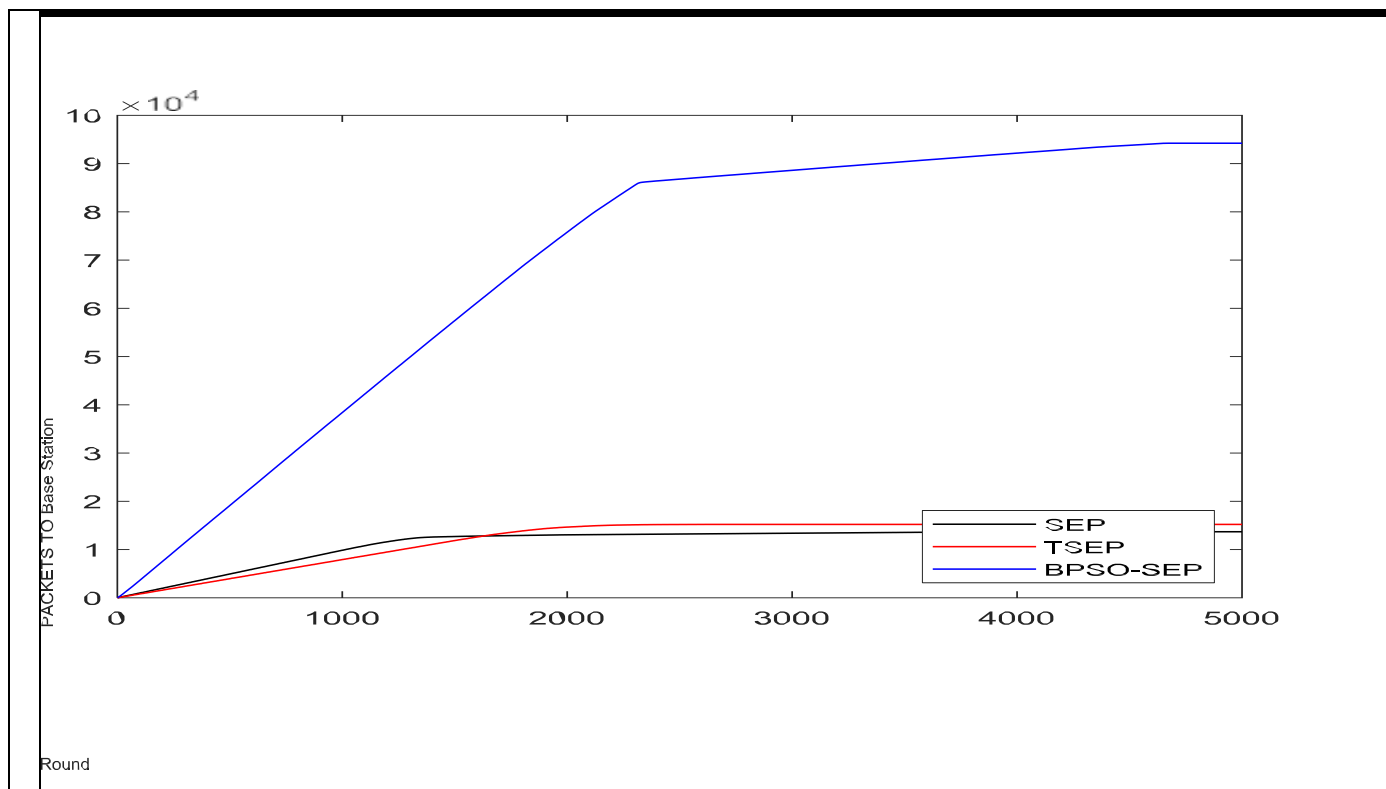
En termes d'énergie résiduelle

En termes de noeudsmorts

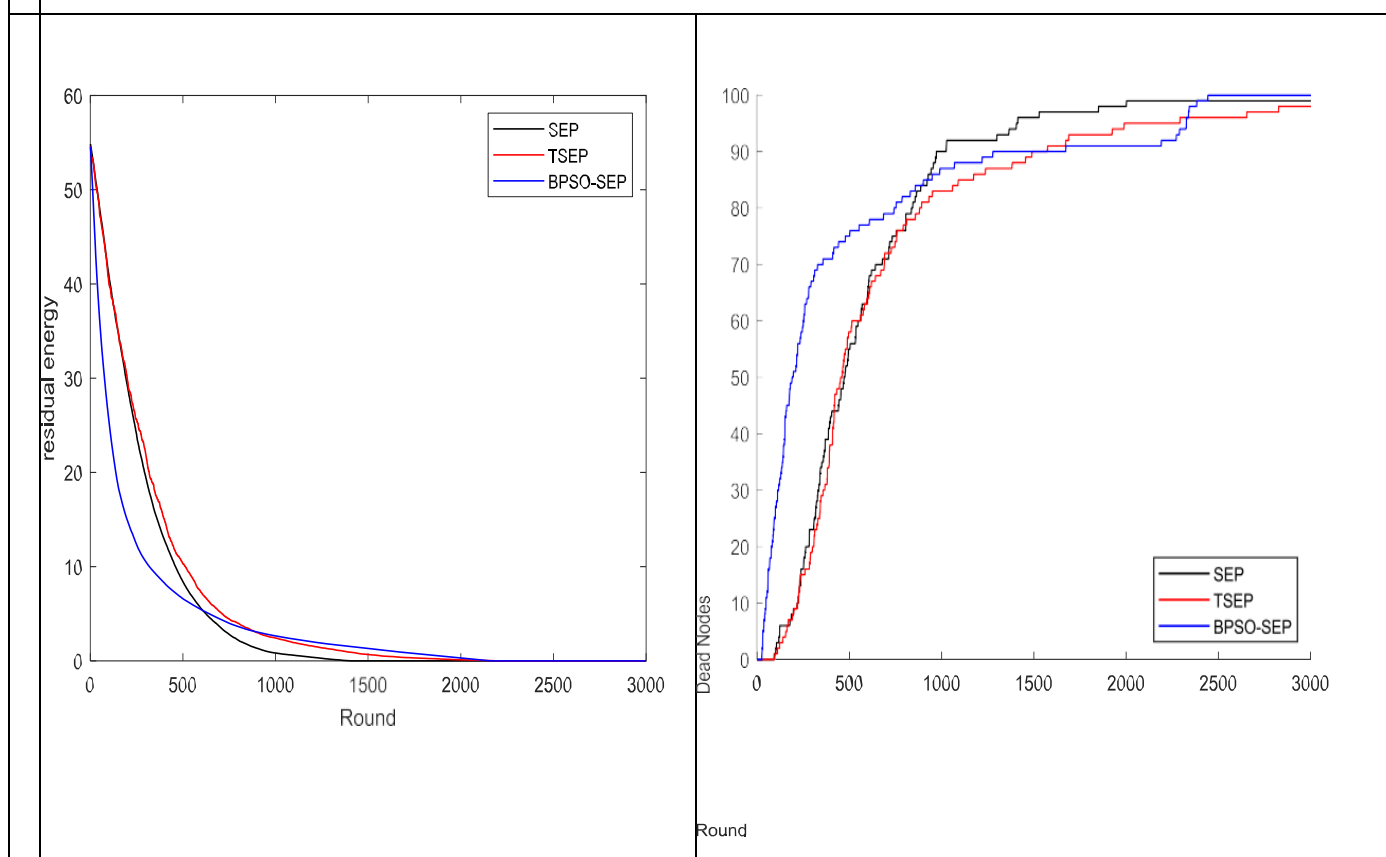


En termes du nombre de paquets délivrés à la station de base

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO



Expérience 2 : 100 nœuds dans une zone de détection 400*400 m2



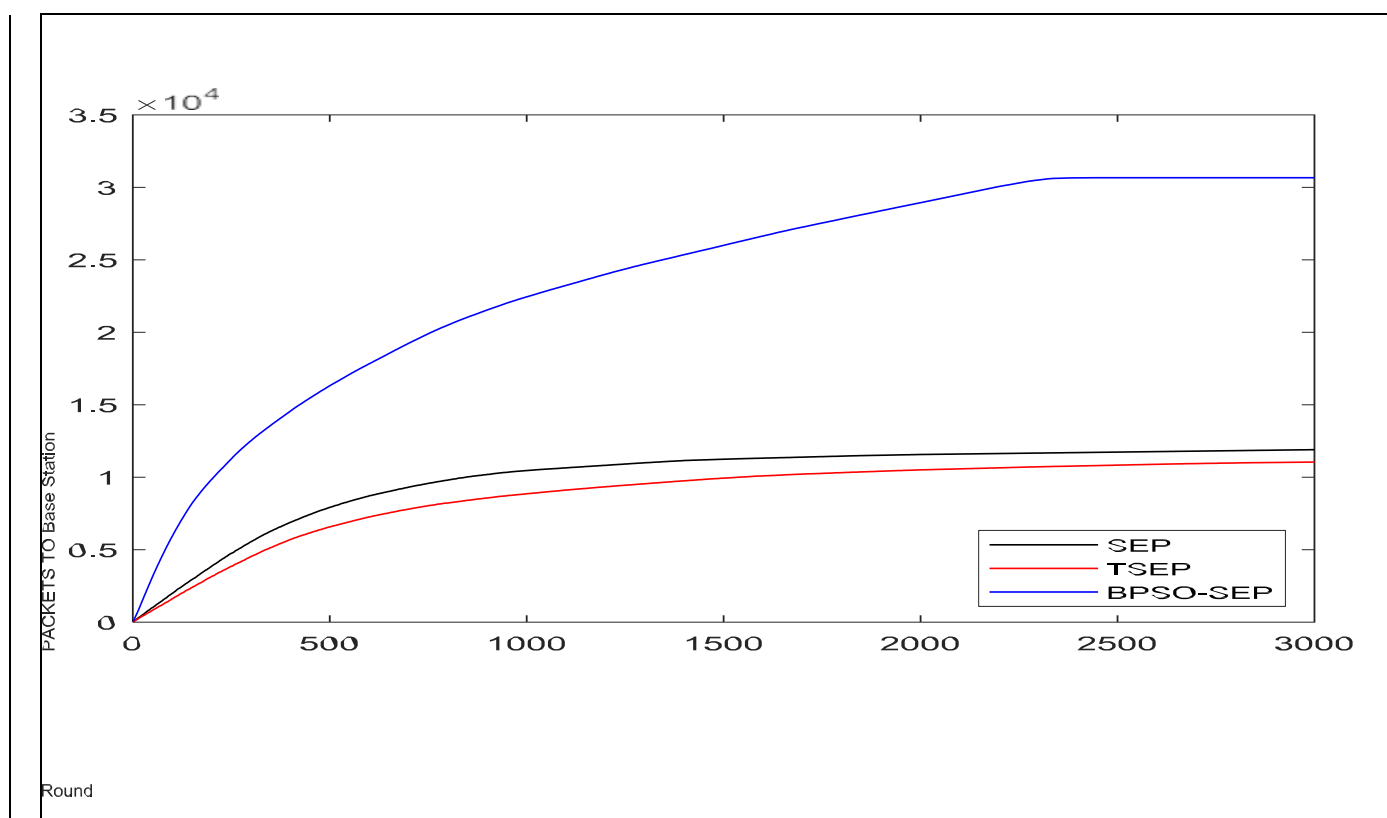


Fig 4.1:

Courbes comparatifs (SEP, TSEP & BPSO-SEP)

Et ci-dessous sont les données numériques correspondantes aux courbes précédentes de la première expérience.

Table 4-3 les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-SEP de la fig.4.1

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1900 1er mort	6.5022	48	0.0150
2200 durée stabilité	2.6249	41	0.0160
4600 mort totale	0	0	0

Table 4-4. les données numériques correspondantes aux courbes TSEP

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1500 1er mort	5.7212	49	0
1900 durée stabilité	1.0856	26	0
2300 mort totale	0	0	0

Table 4-5. Les données numériques correspondantes aux courbes SEP

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1000 1er mort	5.9442	49	0
1300 stabilité	0.8195	26	0.0160
1600 mort totale	0.1008	2	0

A partir des courbes et tableaux précédents, il est clair que l'approche proposée basée sur SEP modifié en utilisant la méthode d'optimisation BPSO, surpasse SEP et TSEP en terme de la conservation d'énergie, le nombre de paquets délivrés à la station de base et la durée de vie du réseau.

4.7 Conclusion:

Chapitre 4 : L'implémentation des protocoles SEP, PSO et BPSO

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement de simulation avec lequel nous avons travaillé, à savoir le simulateur MATLAB. Par la suite, nous avons exposé les paramètres de simulation ainsi que les résultats obtenus de la simulation qui confirment l'efficacité de notre protocole proposé. Après avoir implémenté et simulé les deux protocoles SEP et notre protocole proposé, nous avons démontré que ce dernier apporte

Conclusion générale



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Au terme de ce travail consacré aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF), il apparaît clairement que ces systèmes représentent aujourd'hui un pilier essentiel de la transformation numérique, tant par leur capacité à collecter et transmettre des données en temps réel que par leur adaptabilité à des contextes variés. Les RCSF se distinguent par leur architecture distribuée, leur flexibilité de déploiement et leur aptitude à répondre à des besoins de surveillance, de contrôle et d'automatisation dans de nombreux domaines, qu'il s'agisse de l'environnement, de l'industrie, de la santé ou de la sécurité.

Cependant, la conception, la mise en œuvre et la gestion de ces réseaux soulèvent de nombreux défis, notamment en matière de consommation énergétique, de sécurité des communications, de fiabilité des transmissions et d'auto-organisation. Les contraintes liées aux ressources limitées des nœuds capteurs, à la dynamique des topologies et à la diversité des environnements d'application imposent le développement de solutions innovantes, tant au niveau matériel que logiciel. La gestion optimale de l'énergie demeure un enjeu central pour garantir la longévité du réseau, tandis que la sécurité doit être assurée malgré la faible capacité de calcul et de stockage des nœuds.

Tout au long de ce document, nous avons mis en lumière les principes de base des RCSF, leurs architectures, leurs principales caractéristiques, ainsi que les problématiques majeures auxquelles ils sont confrontés. Nous avons également présenté les différentes solutions envisagées pour relever ces défis, en insistant sur l'importance d'une approche globale et adaptée à chaque contexte d'application.

En conclusion, bien que les réseaux de capteurs sans fil aient déjà démontré leur potentiel dans de nombreux secteurs, ils restent un domaine de recherche et d'innovation en pleine évolution. Les progrès futurs dépendront de la capacité des chercheurs et des ingénieurs à concevoir des systèmes toujours plus économes, sécurisés, robustes et intelligents, capables de s'intégrer harmonieusement dans les environnements les plus exigeants. Les RCSF continueront ainsi de jouer un rôle clé dans le développement de solutions connectées, au service d'une société plus intelligente, plus réactive et plus durable.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] Athmani Samir. Mémoire de Magistère : Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil. Université Hadj Lakhder - Batna
- [2] Réseaux de capteurs : définition et applications : /www.techniques-ingenieur.fr
- [3] Diery Ngom. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Haute Alsace - Mulhouse ; Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal ; 1957-..), 2016. Français.
- [4] Ben Chaoui Fouad. Mémoire de Master : Planification d'itinéraires de protocole LEACH sur l'algorithme GRASP dans les réseaux de capteurs sans fil. Université Kasdi Merbah - Ourgla.
- [5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_de_capteurs_sans_fil.
- [6] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-capteurs-sans-fil>.
- [7] https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_1.
- [8] SARI Mounya Amal. Mémoire de Master : ETUDE DU RSSI POUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL. Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen.
- [9] Lynda TLILI. MODELE DE CONFIANCE POUR SECURISER LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL. UNIVERSITÉ MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [10] Yaser Yousef. Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Autre [cs.OH].Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010.
- [11] RABIA Fatima Mélissa, TAZIBT Celia Yasmine. Déploiement d'un réseau de capteurs sans fil en technologie ZigBee. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [12] www.researchgate.net/figure/Composants-dun-capteur-sans-fil_fig2.
- [13] FEHAM Mohammed. Projet national de recherche : rapport final : MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL POUR LA DÉTECTION DES FEUX DE FORÊT. Université de Tlemcen.
- [14] David MARTINS, Hervé GUYENNET. Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil.
- [15] Sécurité des réseaux de capteurs sans fil : /www.techniques-ingenieur.fr
- [16] chapitre 01-RCSF. <https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/>.

Bibliographie

- [17] Yacine Challal. Réseaux de Capteurs Sans Fils. Version 1 18/11/2008.
- [18] HANNECHE Amel, " Conception d'un nouveau protocole pour les réseaux de capteurs sans fils», Université L'arbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi 2020-2021
- [19] GUERFI Imane – HATTAB Meriem, "Etude comparative entre les deux protocoles de routage CTP et LEACH dans les réseaux WSNs ", UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA 2022
- [20] OURAD karima. ZEGROUR Zahia, "Optimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ", Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU 2013-2014
- [21] Ala Eddine Boulifa Mohammed Habes, "Étude comparative entre deux protocoles de routage géographiques sans balises BLR et BOSS dans les réseaux WSNs ", université Kasdi Merbah OUARGLA 2020
- [22] MALKI Hocine, "Étude comparative entre deux protocoles de routage géographiques sans balises BOSS et Geraf dans les réseaux WSNs ", université Kasdi Merbah OUARGLA /2019
- [23] Ali BENZERBADJ, "Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance", Thèse de doctorat en Informatique, université d'Oran, 02/07/2018
- [24] Mr SAHRAOUI belkheyr, "Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil ", 2012-2013, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen Faculté des Sciences Département d'Informatique
- [25] Mlle. Mehiaoui Amina, " Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil ", université abou bekr belkaid tlemcen 2015
- [26] Leila Imane NIAR, "Analyse Graphique pour la surveillance dans un réseau de capteurs sans fils (RCSF) Simulateur : OMNET++" Université d'Oran, 2012
- [27] YUCEF ZIAN, "ÉTUDE COMPARATIVE DE MÉTHODES DE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL POUR LE DOMAINE RÉSIDENTIEL" L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES 2013
- [28] https://fr.wikipedia.org/wiki/Routage_ad_hoc
- [29] GUEMMADI Sabrina, "Adaptation de clustering phase de protocole de routage « LEACH » pour les réseaux de capteurs sans fil", Université Larbi Tebessi – TEBESSA 2019 2020

Bibliographie

- [30] Abdelkader TOUDJI et Abdallah DLIMI, " Une approche hybride pour conception d'un protocole de routage multi-saut dans les réseaux de capteur sans fil" Université Ahmed Draia – Adrar 2017
- [31] khalili zeyneb et bouchra Meryem Une technique d'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil Université Ahmed Draia - Adrar2019
- [32] TOUAT Fatma, Touati manel, "application de détection de présence par réseau de capteur sans fil simulation dans l'environnement tinyOS", Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou 2015
- [33] : ben Abdellah djemaa ben ramdane mebarka, " Segmentation d'image par méthode de métaheuristique PSO " Faculté des Sciences et Technologies Ghardaïa 2018
- [34] Kenza Redjimi, Salima Nebti, Mohammed Redjimi, " a routing protocol based on binary particle swarm optimization BPSO-SEP"
- [35] Kholidiyah Masykuroh¹, Afifah Dwi Ramadhani², Islamiyanto Hudan Raharjo³;" Sink position analysis of energy efficiency in Wireless Sensor Network (WSN) using routing Stable Election Protocol (SEP)
- [36] Safia Djemame Mohamed Batouche, 2002 " Une Approche de Détection de Contours Basée sur la Métaheuristique OEP " page 2 A R I M A – Volume 1
- [37] Boukhalfa Sara Naimi Fatima Zohra, "La reconstruction 3D d'un cube par la technique PSO" université kasdi merbah ouargla 2017
- [38] Amira Gherboudj, " Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques " Université de Constantine2 2013