

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 Skikda



Faculté des sciences-Département de l'informatique
Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master professionnel
en informatique

Option : Réseaux et systèmes distribués (R.S.D)

Thème

Développement d'un protocole de routage efficace en énergie dans les RCSFs basé sur SEP

Réalisé par

Sahli Safa

Khettaf Lamis

Encadré par

Dr. Nabti Salima

Co-dirigé par

Pr. Redjimi Mohammed

Année universitaire : 2021 / 2022



Remerciements

Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux le plus grand merci lui revient de nous avoir guidé vers le droit chemin, de nous avoir aidé tout au long de nos années d'étude et pour toutes ses grâces qui nous entourent. Nous adressons nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. Nous tenons à remercier sincèrement Madame Nabti Salima, qui, en tant qu'encadreur de ce mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de notre travail, ainsi que pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Nos remerciements s'adressent également à Monsieur Mohamed Redjimi: notre enseignant et Co-encadreur pour sa générosité, sa confiance, et la grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges. Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer et d'examiner ce travail, et de consacrer une partie de leurs précieux temps afin de le juger au mieux. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire et spécialement Chaima. Nous remercions particulièrement nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Merci à tous et à toutes

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Belkacem.

A la femme qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation et de ses dévouements : ma chère mère Daouia.

A mon adorable sœur Wafa et mon cher frère Mohammed Rafik.

A ma chère sœur Karima et son mari Tewfik.

*A ma nièce et mon neveu qui sont la cause de ma joie;
ma princesse Meriem et le petit Adem*

A ma binôme Lamis

A toutes ma famille

A toutes mes amies

Safa



Grace à ALLAH nous avons réussi à achever ce modeste travail, et grâce à ALLAH nous sommes arrivées à nos espérances.

A mes très chers parents :

M. K. RACHID, Mme K. RACHIDA

Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez fait pour moi. Je ferai de mon mieux pour rester un sujet de fierté à vos yeux avec l'espoir de ne jamais vous décevoir. Que ce modeste travail, soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et de vos prières quotidiennes.

A mes très chers frères :

Vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès (Mohamed Rafik et Abdelhak).

A mes très chères amies :

En souvenir de nos éclats de rire et des bons moments. En souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble. J'espère de tout mon cœur que notre amitié durera éternellement (B.Chaima, C.Amani, B.Dounia, C.Ikram, K.Chams et H.Chaima).

Lamis

TABLES DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS	10
LISTES DES FIGURES.....	12
LISTE DES TABLEAUX	13
RESUME	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCTION GENERALE :.....	2
 <i>Chapitre 01: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil</i>	
1 INTRODUCTION :	5
2 UN SIMPLE HISTORIQUE DES RCSFS :.....	5
3 PRESENTATION D'UN CAPTEUR SANS FIL :.....	5
3.1 DEFINITION :.....	6
3.2 ARCHITECTURE :.....	6
3.2.1 Unité de captage :	7
3.2.2 Unité de traitement :.....	7
3.2.3 Unité de communication :	7
3.2.4 Unité d'énergie :	7
4 PRESENTATION D'UN RESEAU DE CAPTEUR SANS FIL:	8
4.1 DEFINITION :.....	8
4.2 ARCHITECTURE :.....	8
4.3 TOPOLOGIE DES RCSFS :	9
4.3.1 Topologie en étoile :	9

4.3.2	Topologie en grille :	9
4.3.3	Topologie en arbre :	10
5	CARACTERISTIQUE DES RESEAUX DE CAPTEUR SANS FIL :	10
5.1	CONTRAINTE D'ENERGIE :	10
5.2	L'ABSENCE D'INFRASTRUCTURE :	11
5.3	UN GRAND NOMBRE DE CAPTEURS :	11
5.4	CONTRAINTE D'ENERGIE :	11
5.5	TOPOLOGIE DYNAMIQUE :	11
5.6	AUTO ORGANISATION DU RESEAU :	11
5.7	SECURITE PHYSIQUE LIMITE :	11
6	ARCHITECTURE DE COMMUNICATION DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL :	11
6.1.1	Couche transport :	12
6.1.2	Couche application :	12
6.2	LES PLANTS DE LA PILE PROTOCOLAIRE :	12
6.2.1	Plan de gestion d'énergie :	13
6.2.2	Plan de gestion de mobilité :	13
6.2.3	Plan de gestion des tâches :	13
7	CONSOMMATION D'ENERGIE DANS LES RCSFS :	13
7.1	ENERGIE DE TRAITEMENT :	13
7.2	ENERGIE DE DETECTION :	13
7.3	ENERGIE DE COMMUNICATION :	13
8	CONTRAINTES DE CONCEPTION DES RCSFS :	13
8.1	LA TOLERANCE AUX PANNES :	14
8.2	FACTEUR D'ECHELLE :	14
8.3	LES COUTS DE PRODUCTION :	14
8.4	LES CONTRAINTES MATERIELLES :	14

8.5	L'ENVIRONNEMENT :	14
8.6	LES MEDIAS DE TRANSMISSION :	14
8.7	LA CONSOMMATION D'ENERGIE :	14
9	DOMAINE D'APPLICATION DES WSN:	15
9.1	DOMAINE MILITAIRE :	15
9.2	APPLICATIONS ENVIRONNEMENTALES :	16
9.3	APPLICATIONS COMMERCIALES :	16
9.4	APPLICATIONS MEDICALES :	16
9.5	APPLICATION A LA SECURITE :	16
10	LA SECURITE DANS LES RCSFS :	16
11	PROBLEMES LIES AUX RESEAUX DE CAPTEUR SANS FIL :	17
11.1	CONSOMMATION D'ENERGIE :	17
11.2	LOCALISATION :	17
11.3	ENVIRONNEMENT :	18
11.4	LA DUREE DE VIE :	18
11.5	LA SECURITE :	18
11.6	AGREGATION DES DONNEES :	18
11.7	TOPOLOGIE DYNAMIQUE :	19
12	CONCLUSION :	19

Chapitre 02: Les protocole de routage dans les RCSFs

1	INTRODUCTION :	21
2	LE ROUTAGE :	21
3	PROTOCOLE DE ROUTAGE :	21
4	CLASSIFICATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE DES RCSFS :	22
4.1	LA TOPOLOGIE DU RESEAU :	22
4.1.1	Les protocoles hiérarchiques :	23

4.1.2 Les protocoles plats :	29
4.1.3 Les protocoles géographiques :	30
4.2 TAXONOMIE SELON LE FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE :	32
4.2.1 Protocole basé sur la QoS :	32
4.2.2 Routage basé sur la négociation :	32
4.2.3 Routage basé requête (interrogation) :	32
5 CONCLUSION :	33

Chapitre 03 : Proposition d'un protocole de routage basé sur SEP

1 INTRODUCTION :	35
2 LE PROTOCOLE SEP (STABLE ELECTION PROTOCOL).....	35
2.1 DEFINITION :	35
2.2 LE FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE SEP :	37
2.3 LES LACUNES DE L'ALGORITHME SEP :	38
3 LE PROTOCOL TSEP (THRESHOLD SENSITIVE STABLE ELECTION PROTOCOL):.....	38
3.1 LE MODELE ENERGETIQUE	40
4 L'OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES PSO :	41
4.1 DEFINITION :	41
5 L'OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES BINAIRES (BPSO) :	44
5.1 LA SELECTION DE CHS PAR PSO BINAIRE :	45
6 REPRESENTATION DES PARTICULES :	45
7 LA FONCTION OBJECTIVE :	46
8 CONCLUSION :	46

Chapitre 04: Simulation

1	INTRODUCTION	48
2	SIMULATION ET RESULTATS EXPERIMENTAUX :	48
2.1	CHOIX DE SIMULATEUR MATLAB :	49
2.2	PARAMETRES INITIAUX:	49
3	CONCLUSION :	54

Liste des abréviations

RCSF	Réseau de capteur sans file
WSN	Wireless sensor network
SEP	Stable Election Protocol
TSEP	Threshold sensitive Stable Election Protocol
PEGASIS	Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol
APTEEN	Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol
SPIN	Sensor Protocole for Information via Negotiation
DD	Directed Diffusion
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
MECN	Minimum Energy Communication Network
ADC	Analogie to Digital Convertir
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
CH	Cluster-Head
BS	Base Station
TDMA	Time Division Multiple Access

MAC	Media Access Control
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
IDE	Integrated Développement Environnement
ADV	Avertissement message
REQ	Route Request
HWSN	Réseaux hétérogène des capteurs sans fil
PSO	Particule swarm optimisation

Listes des figures

Chapitre 01 :

Figure 1.1 exemples des capteurs	6
Figure 1. 2 Architecture d'un capteur sans fil [3]	7
Figure 1.3 : Architecture d'un réseau de capteur sans fil [5]	8
Figure 1.4 : Topologie étoile [10]	9
Figure 1.5: Topologie en grille [10].....	9
Figure 1.6: Topologie arbre [10]	10
Figure 1.7 : architecture en couche de RCSF [8]	12
Figure 1.8 : Quelques domaines d'application de RCSFs [9].....	15

Chapitre 02 :

Figure 2.1 : taxonomie de la topologie de réseau [18]	22
Figure 2.2 : Le routage hiérarchique [22]	23
Figure 2. 3 : Architecture du routage hiérarchique LEACH.....	24
Figure 2.4 : opérations de la phase d'initialisation [24]	26
Figure 2. 5 : Transmission des données à la station de base.....	27
Figure 2.6 : le routage plat.....	29
Figure 2.7 : protocole géographique [27].....	30
Figure 2.8 : Taxonomie selon le fonctionnement de protocole.....	32

Chapitre 03 :

Figure 3. 1 : Time Line operation de SEP	36
Figure 3.2 : L'organigramme de l'algorithme du protocole d'élection stable sensible au seuil (TSEP).[36]	40
Figure 3.3 : Déplacement d'une particule	43
Figure 3. 4 : représentation des particules	46

Chapitre 04 :

Figure 4. 1 : Courbes comparatifs (SEP, TSEP& BPSO-SEP).....	52
--	----

Liste des tableaux

Tableau 1 : paramètres du réseau.....	49
Tableau 2 : Paramètres du BPSO.....	50
Tableau 3 : les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-SEP de la figure 3.5 :.....	53
Tableau 4 : Les données numériques correspondantes aux courbes TSEP de la figure 3.5 :.....	53
Tableau 5 : les données numériques correspondantes aux courbes SEP de la figure 3.5 :.....	53

Résumé

Dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), les nœuds capteurs dotés d'une infrastructure de détection, de calcul et de communication sont déployés de manière aléatoire et organisés en clusters. La plupart des recherches sur les réseaux de capteurs existants se concentrent sur l'homogénéité dans lesquels les cluster chefs sont changées périodiquement. Afin d'améliorer la durée de vie des RCSFs qui sont alimentés par des batteries à contrainte d'énergie limitée, les réseaux de capteurs hétérogènes ont été proposés. Notre méthode proposée combine le clustering équilibré en charge, avec l'hétérogénéité. Elle peut être considérée comme protocole SEP modifié, où la sélection des cluster-chefs est basée sur la méthode d'optimisation par essaim de particules binaire au lieu de se baser sur une fonction probabiliste tel est le cas du protocole SEP.

Les résultats expérimentaux sous MATLAB montrent que l'approche proposée a une consommation d'énergie plus faible et une durée de vie plus étendue par rapport au protocole SEP.

***Mots clés:** RCSF, efficacité d'énergie, protocole de routage hiérarchique, optimisation par essaim de particules binaires, LEACH, SEP.*

Abstract

In Wireless Sensor Networks (WSNs), sensor nodes with sensing, computing and communication infrastructure are randomly deployed and organized into clusters. Most of the research on existing sensor networks focuses on homogeneity in which cluster heads are changed periodically. In order to improve the lifetime of WSNs which are powered by batteries with limited energy, heterogeneous sensor networks have been proposed. Our proposed method combines load-balanced clustering with heterogeneity. It can be considered as a modified SEP protocol, where the selection of cluster-heads is based on the binary particle swarm optimization method instead of being based on a probabilistic function as is the case with the SEP protocol.

Experimental results under MATLAB show that the proposed approach has lower energy consumption and a longer lifetime compared to the SEP protocol.

Keywords:

WSNs, energy efficiency, hierarchical routing protocols, binary particle swarm optimization, LEACH, SEP.



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) consistent d'un grand nombre de nœuds, ayant la capacité de détecter, calculer et communiquer sans fil. Ces nœuds capteurs, sont généralement équipés par des batteries de durée de vie limitée et doivent fonctionner sans surveillance ni contrôle après leur déploiement. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie de la batterie est un problème critique dans les réseaux sans fil. Les RCSFs est une technologie émergente qui possède un large éventail d'applications, telles que la surveillance de l'environnement, la surveillance des domiciles et aide à la vie autonome, les soins médicaux, automatisation industrielle, agriculture, gestion de la transportation, suivi des animaux, surveillance de l'habitat et nombreuses applications militaires. Ils collectent l'information de l'environnement où ils se sont déployés et les envoient à une station de base distante pour leur traitement [46].

Le routage dans les RCSFs est un défi majeur en raison des caractéristiques fondamentales qui différencient ces réseaux des autres réseaux sans fil. La batterie limitée est la contrainte la plus importante dans les RCSFs, le besoin d'une consommation d'énergie moindre, les contraintes des nœuds capteurs qui doivent utiliser une petite capacité de mémoire, une courte portée de transmission et le minimum de calculs. Tous cela a suscité les chercheurs à mettre en place des protocoles de routage qui gèrent efficacement un réseau de capteurs sans fil. Plusieurs protocoles de routage existent pour les RCSFs. Ces protocoles peuvent être classés en protocoles hiérarchiques, plats et basés sur la localisation [47].

Dans ce mémoire nous nous intéressons au problème de la consommation d'énergie du RCSF, plus particulièrement nous allons étudier l'efficacité des méthodes de la recherche globale telles que PSO dans l'optimisation et la réduction de la consommation énergétique dans un réseau de capteur sans fil à deux niveaux d'hétérogénéité.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le 1^{er} chapitre : nous présenterons une introduction au domaine des réseaux de capteurs de fil. Nous commençons d'abord par la définition des différentes notions et concepts gravitant autour de cette thématique, ensuite nous exposons quelques domaines d'application des RCSFs, et leurs contraintes.

Dans le 2^{eme} chapitre : nous traiterons les protocoles de routage, dans ce chapitre on se focalise au concept du routage dans les RCSFs, où nous exposons une classification selon quelques critères pour les protocoles de routage proposés dans la littérature.

Dans le 3^{eme} chapitre : nous détaillons le protocole SEP et Sa variante TSEP, nous proposons ensuite une extension du protocole SEP basée sur la méthode d'optimisation BPSO, Après, nous montrons les résultats obtenus en comparaison à SEP et TSEP.

1 Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) montrent des résultats prometteurs pour leur capacité à fournir une multitude d'applications telles que la détection d'incendie et la circulation des véhicules. Les applications fournies par les RCSFs sont basées sur de petits nœuds capteurs. Ces dispositifs ont pour mission de collecter des données et de les transmettre à un nœud spécifique appelé « Sink ». Ce chapitre présente les caractéristiques et l'architecture du réseau, les applications et services offerts par les réseaux de capteurs sans fil, et enfin les systèmes d'exploitation et les protocoles de routage de ces réseaux.

2 Un simple historique des RCSFs :

Dans les années 1990, est apparue l'idée de surveiller en temps réel les événements à distance, pour pouvoir éviter les catastrophes naturelles et économiser le coût d'installation de cette nouvelle technologie dite la poussière intelligente (capteurs de petites tailles et de petite capacité).

La poussière n'a pas vraiment pris de temps pour devenir une réalité. Aujourd'hui les réseaux de capteurs sont devenus des systèmes fiables et robuste pouvant surveiller de très grandes espaces. Les derniers progrès en terme de miniaturisation, ainsi que le remplacement du câblage classique par les communications à base des signaux de la radio, ont contribué à la mise en place de nouvelles applications qui visent de nombreux domaines : l'aéronautique, l'automobile, le médical, l'environnement, etc. [9].

3 Présentation d'un capteur sans fil :

3.1 Définition :

Un capteur sans fil est un dispositif électronique de petite taille capable de mesurer des grandeurs physiques de son environnement de déploiement comme la température, lumière, pression, humidité, vibration, ... etc.

Le capteur est capable aussi de communiquer avec les nœuds voisins ou directement avec une station de base. Chaque capteur assure les trois fonctions de base qui sont : l'acquisition de données, le traitement de données et la communication [1].

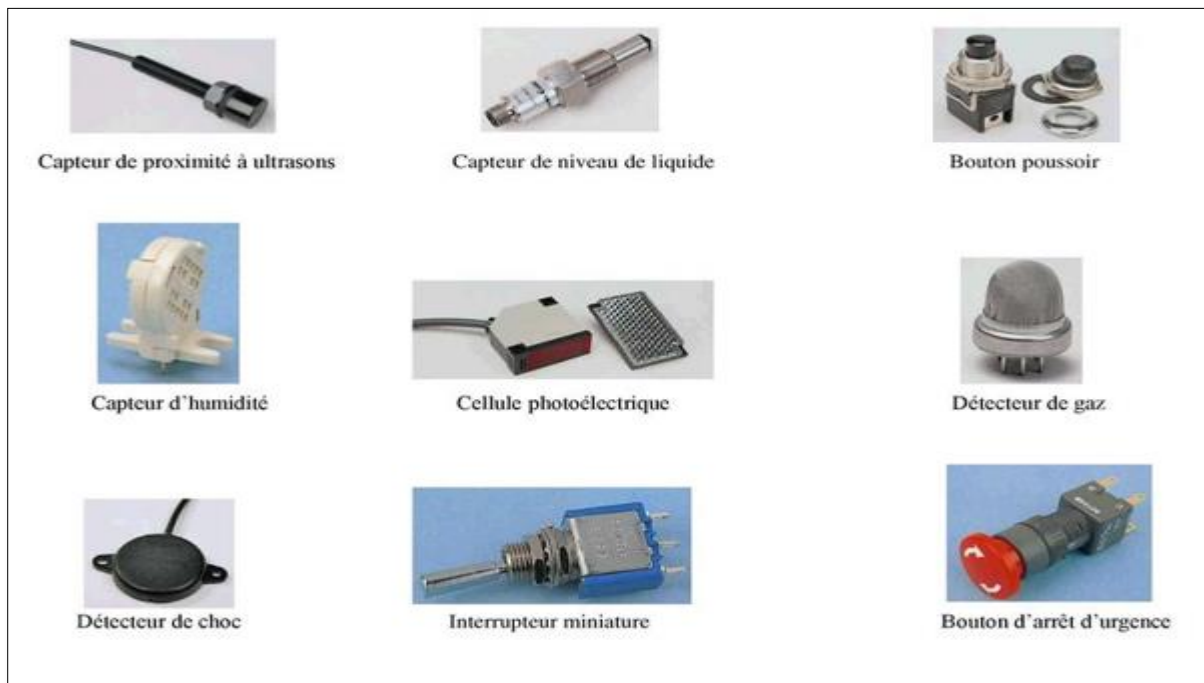


Figure 1.1 exemples des capteurs

3.2 Architecture :

Un nœud capteur est composé de quatre unités principales : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, selon le domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire) [2].

3.2.1 Unité de captage :

L'unité de captage est constituée de deux sous-unités : l'unité de détection qui obtient les mesures environnementales et un convertisseur Analogique/Numérique. L'unité de détection fournit les signaux analogiques, suivant le phénomène surveillé, et le convertisseur Analogique/Numérique transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [2].

3.2.2 Unité de traitement :

L'unité de traitement contient un processeur avec petite mémoire de stockage et fonctionne avec un système d'exploitation dédié aux micro-capteurs. Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles mis en place pour communiquer les nœuds entre eux. Elle peut aussi analyser les données collectées par le capteur [2].

3.2.3 Unité de communication :

Elle est responsable de toutes émissions et réceptions des données sur un canal « sans-fil ». Elle peut être de type optique ou de type radiofréquence [2].

3.2.4 Unité d'énergie :

Elle est responsable de la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur. [2].

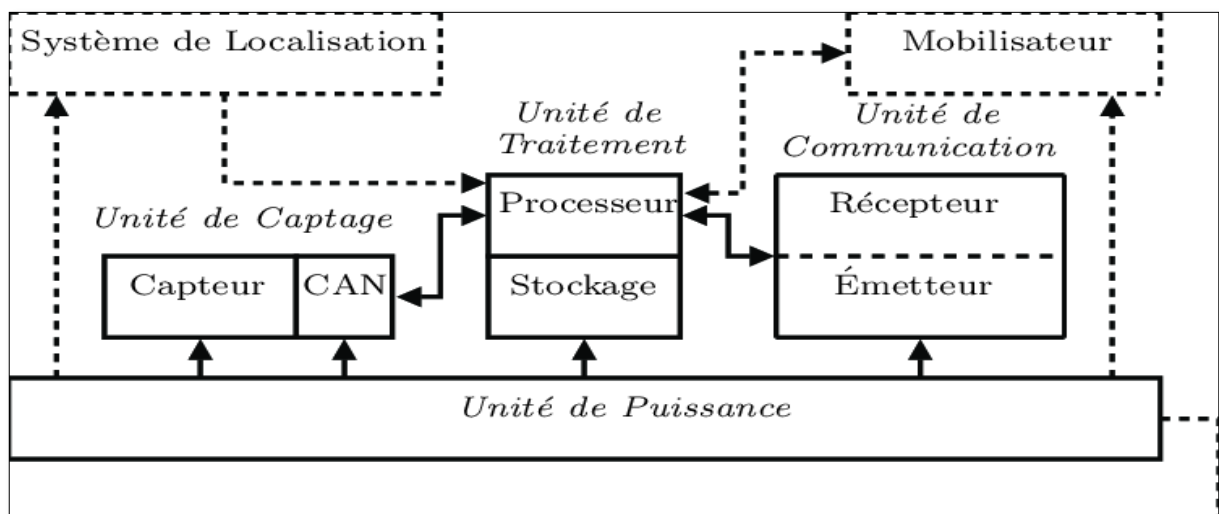


Figure 1. 2 Architecture d'un capteur sans fil [3]

4 Présentation d'un réseau de capteur sans fil:

4.1 Définition :

Un réseau de capteur sans fil est un réseau composé d'un nombre de nœuds capteurs pouvant communiquer sans fil. Ces réseaux permettent aux utilisateurs de se connecter avec eux indépendamment de leurs positions physiques. [4]

4.2 Architecture :

Ce type de réseaux est constitué d'un grand nombre de micro-capteurs déployés par centaines ou milliers, capables de récolter les données environnementales d'une façon autonome et se communiquent par des signaux de la radio, l'infrarouge ou l'optique. Leurs positions peuvent être aléatoires dans la zone à surveiller, appelée zone d'intérêt. Les protocoles de leur gestion doivent donc auto-reconfigurable afin de résister aux pannes éventuels.

Les nœuds capteurs doivent aussi pouvoir survivre dans des conditions environnementales sévères telles que le feu, l'eau ...etc.

Les données collectées sont routées à partir du nœud source jusqu'à leur destinataire (le nœud puits) via une architecture multi-saut. Le nœud puits peut être connecté à l'utilisateur via Internet ou satellite [4].

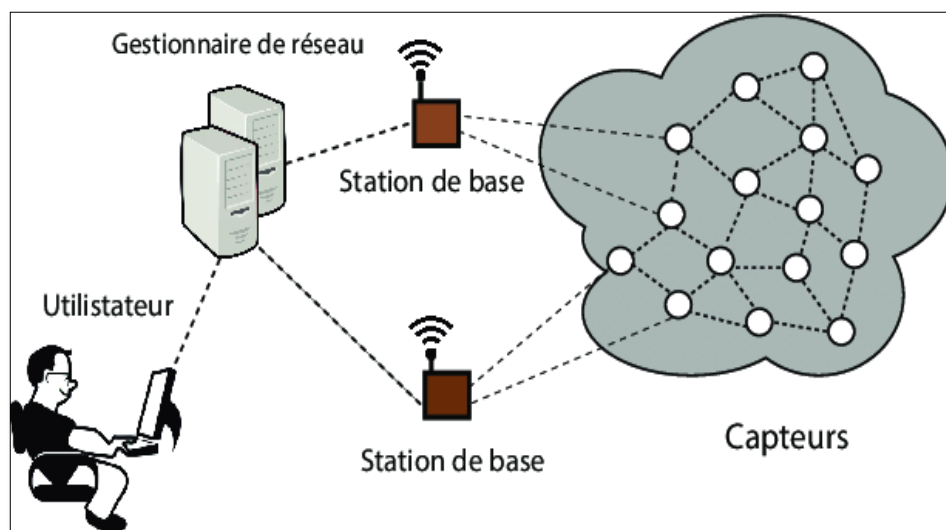


Figure 1.3 : Architecture d'un réseau de capteur sans fil [5]

4.3 Topologie des RCSFs :

On peut distinguer trois types de topologies :

4.3.1 Topologie en étoile :

Dans cette topologie les nœuds communiquent directement avec la station de base et ne peuvent pas s'échanger des messages [10].

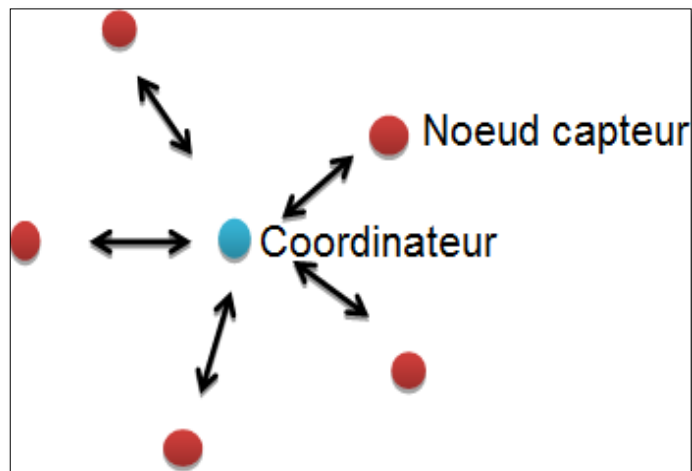


Figure 1.4 : Topologie étoile [10]

4.3.2 Topologie en grille :

Dans cette topologie, n'importe quel nœud peut communiquer avec n'importe quel nœud du réseau qui est dans sa portée de transmission. Ceci est appelé la communication multi-saut [11].

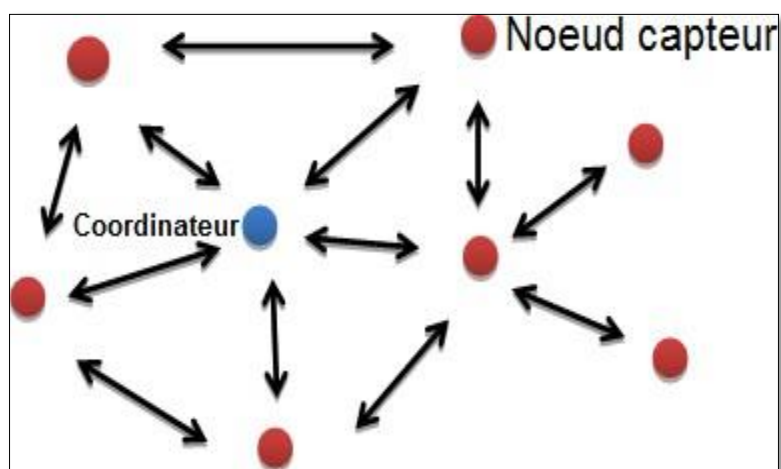


Figure 1.5: Topologie en grille [10]

4.3.3 Topologie en arbre :

Dans cette structure, le réseau est divisé en groupes appelés "clusters". Un Cluster est constitué d'un nœud chef et d'autres nœuds appelés membres. Ces derniers ne communiquent qu'avec leur responsable qui est leur nœud chef ou cluster head (CH). Ce dernier est chargé de faire suivre les messages reçus de ses membres vers la station de base (ou le nœud puit). Cette topologie est donc hiérarchisée selon le rôle de chaque nœud du réseau (coordinateur, cluster-chef, ou nœud membre) [10].

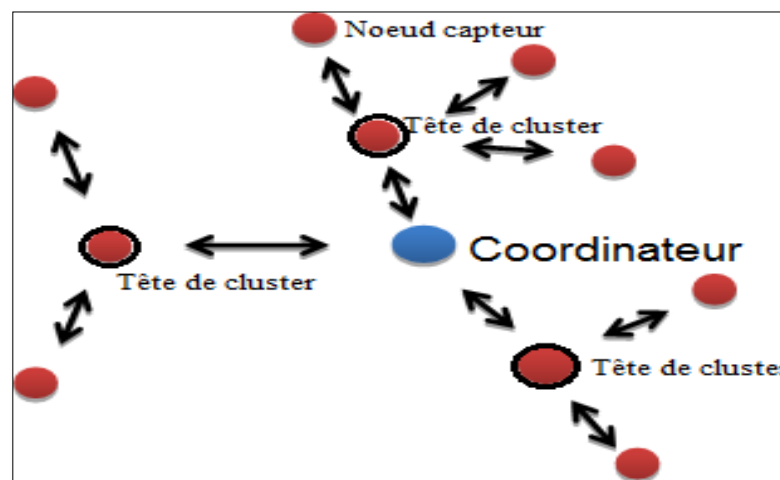


Figure 1.6: Topologie arbre [10]

5 Caractéristique des réseaux de capteur sans fil :

Un réseau de capteurs sans fil est caractérisé par [6]:

5.1 Contrainte d'énergie : Les nœuds sont équipés par des batteries limitées en termes d'énergie, et plus la distance entre deux nœuds est plus grande, plus la consommation d'énergie est plus importante, par conséquent, la consommation d'énergie est une contrainte primordiale dans ce type de réseaux.

5.2 L’Absence d’infrastructure : en tant que réseaux ad hoc, les réseaux sans fil ne possèdent pas une infrastructure bien déterminée (manque de routeur, hub, switch...) car ils se sont les nœuds eux même qui sont responsables d’établir la connectivité du réseau.

5.3 Un grand nombre de capteurs : Des réseaux de plus de 1 000 000 nœuds peuvent être mis en place.

5.4 Contrainte d’énergie : Les nœuds sont équipés par des batteries limitées en termes d’énergie, et plus la distance entre deux nœuds est plus grande, plus la consommation d’énergie est plus importante, par conséquent, la consommation d’énergie est une contrainte primordiale dans ce type de réseaux.

5.5 Topologie dynamique : Dans ce type de réseau la topologie fréquemment changeante due à la mobilité du nœud puits, la défaillance de quelques nœuds, ou la mobilité des nœuds en eux même pour certain type d’applications comme la gestion de la transportation.

5.6 Auto organisation du réseau :

Le réseau doit être capable de se reconfigurer pour continuer sa fonction, même après défaillance de quelques nœuds.

5.7 Sécurité physique limité : Les réseaux sans fil sont plus vulnérables que les réseaux filaires dû à leurs limitations physiques en termes de mémoire et de calculs.

6 Architecture de communication dans les réseaux de capteurs sans fil :

Les RCSF utilise le modèle standard de la communication en couche afin que différents constructeurs puissent bénéficier de la compatibilité des produits (logiciels ou matériels) sans fil.

Ce modèle comprend 5 couches : la couche application, transport, réseau, liaison de données et la couche physique ainsi que 3 sous-couches : la gestion d'énergie, la gestion de tâches et la gestion de la mobilité [7].

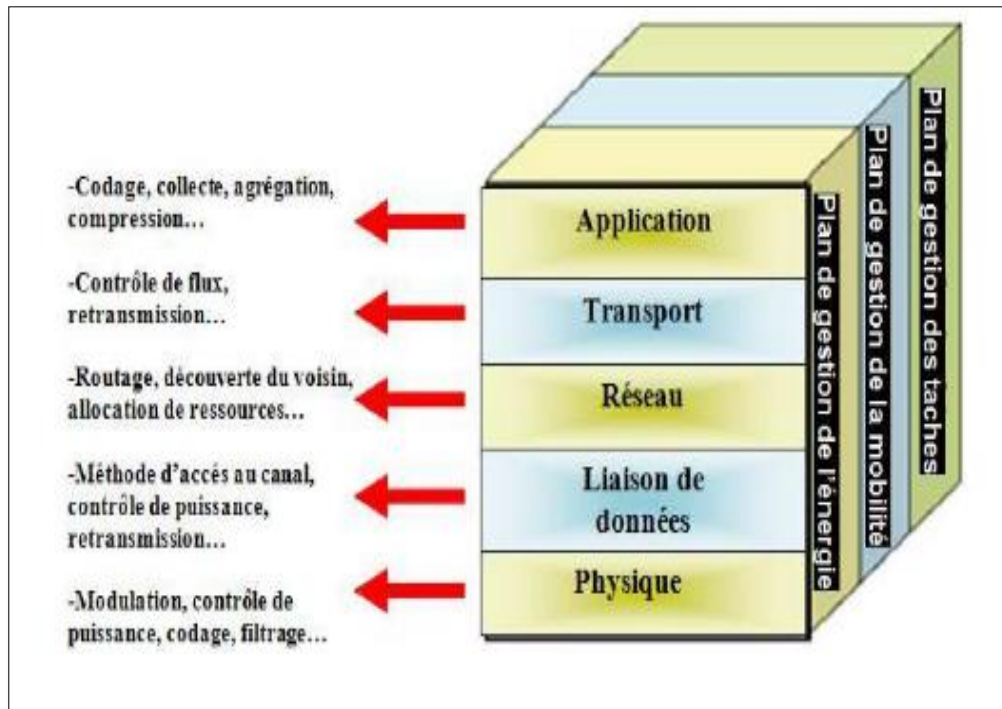


Figure 1.7 : architecture en couche de RCSF [8]

6.1.1 Couche transport : Elle manipule la segmentation des grands paquets.

Elle effectue le contrôle des flots de données de bout en bout afin d'éviter la surcharge du récepteur ou du réseau [15].

6.1.2 Couche application : Elle constitue l'interface avec l'utilisateur. SMP (Sensor Management Protocol) et TADAP (Task Assignment and Data Avertissement Protocol) sont parmi les protocoles d'application utilisés, pour satisfaire les exigences du client [15].

6.2 Les plans de la pile protocolaire :

Les plans de gestion sont nécessaires afin que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble de manière efficace et prolonger la durée de vie du réseau. Les trois plans du RCSF sont :

6.2.1 Plan de gestion d'énergie : contrôle de la batterie.

6.2.2 Plan de gestion de mobilité : détecte et enregistre le mouvement de nœuds.

6.2.3 Plan de gestion des tâches : balance et ordonnance les différentes tâches de captage de données dans une région spécifique.

7 Consommation d'énergie dans les RCSFs :

Les nœuds capteurs ne sont pas alimentés par une source durable. Ils doivent donc utiliser efficacement leurs ressources d'énergie car le changement des batteries n'est pas toujours facile du à leurs emplacements inaccessibles. Avant d'aborder les solutions efficaces en énergie, il est important de donner une idée sur les facteurs provoquant la dissipation de l'énergie du réseau [12].

7.1 Energie de traitement :

L'énergie de traitement se divise en deux types: l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est la capacité totale commutée en exécutant un logiciel. Par contre l'énergie de fuite est l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

7.2 Energie de détection :

Il y a plusieurs sources de consommation d'énergie par le module de détection, notamment, la conversion analogique numérique, l'échantillonnage, les lectures et les écritures en mémoire etc.

7.3 Energie de communication :

L'énergie consommée lors d'une réception ou lors d'une émission. Elle est liée à la quantité des données à communiquer et la distance de transmission.

8 Contraintes de conception des RCSFs :

8.1 La tolérance aux pannes :

La tolérance aux pannes ou fautes est la capacité de maintenir le réseau fonctionnant même après la défaillance de quelques nœuds du réseau ou la survenue d'une [7].

8.2 Facteur d'échelle :

Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités avec un nombre plus important des nœuds et une taille plus grande du réseau [7].

8.3 Les couts de production :

Le prix d'un nœud capteur doit être très faible ca Souvent, les réseaux de capteurs sont composés des milliers de nœuds. [7].

8.4 Les contraintes matérielles :

Un nœud doit être de petite taille, autonome, solide et rigide afin qu'il résiste à la chaleur, l'humidité et d'autres facteurs de son environnement d'installation et sa consommation d'énergie doit être très faible [7].

8.5 L'environnement :

Les capteurs sont souvent déployés des environnements hostiles tels que le fond d'un océan, des champs biologiquement ou chimiquement souillés, ... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance [7].

8.6 Les médias de transmission :

Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé ou normé. Souvent l'infrarouge le Bluetooth et les communications radio sont utilisés [7].

8.7 La consommation d'énergie :

L'épuisement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un ré-routage des paquets, ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'équilibrer la

consommation d'énergie entre les nœuds du réseau, pour étendre leurs durées de vie [7].

9 Domaine d'application des WSN:

Les domaines d'application des réseaux de capteurs sont très nombreux parmi lesquelles nous citons les domaines : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc.

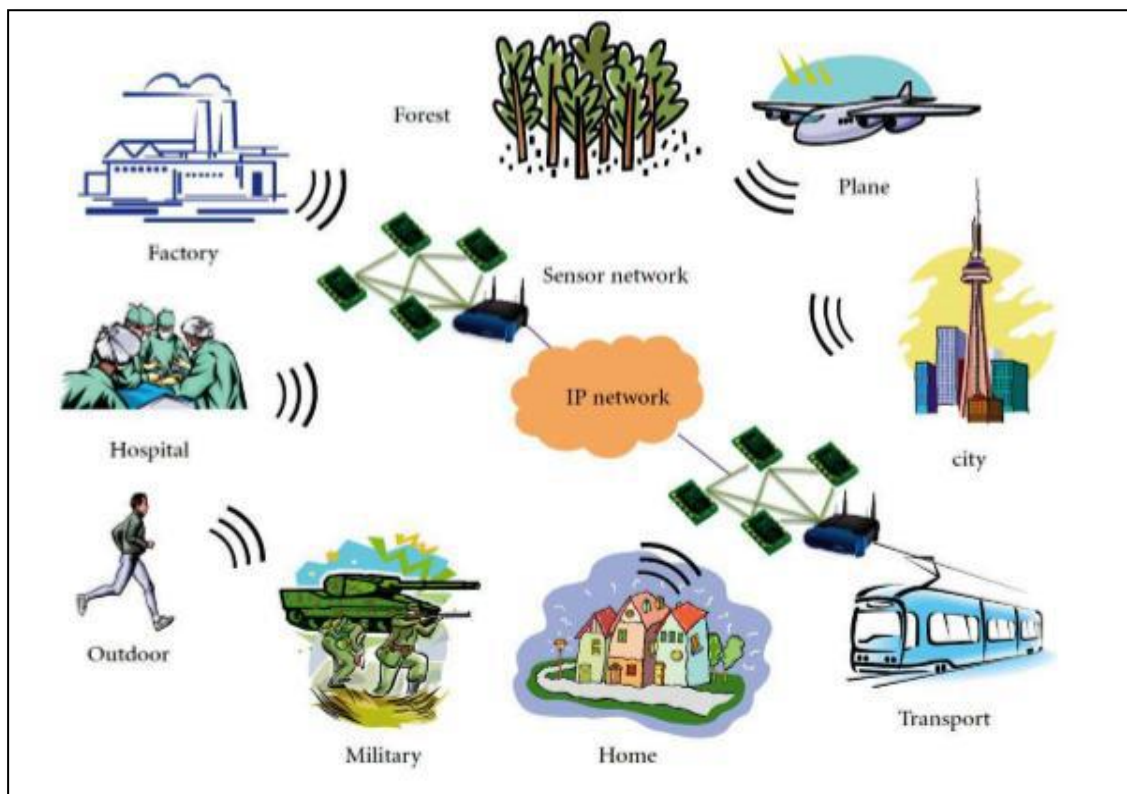


Figure 1.8 : Quelques domaines d'application de RCSFs [9]

9.1 Domaine militaire :

Dans le domaine militaire les capteurs sont utilisés pour surveiller les activités et les mouvements des forces d'ennemies et pour détecter leurs positions, les capteurs dans ce domaine sont utilisés aussi pour la surveillance des endroits spécifiques comme ; champs de bataille, endroit des armes, salle des réunions...etc.

9.2 Applications environnementales :

Dans ce domaine, les nœuds capteurs sont utilisés pour détecter les phénomènes naturels tels que : les tremblements de terre, les volcans, les feux de forêts, la météorologie...etc., ainsi que pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.).

9.3 Applications commerciales :

Dans le domaine commerciale les capteurs sont utilisés pour le contrôle de stocks, pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison, ainsi que pour la surveillance de l'état du matériel.

9.4 Applications médicales :

Dans ce domaine, les capteurs sont utilisés pour une surveillance permanente des patients à distance et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité facilitant le diagnostic de quelques maladies.

9.5 Application à la sécurité :

Dans ce domaine, les capteurs sont utilisés pour diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats.

10 La sécurité dans les RCSFs :

Dans les applications réelles, les nœuds peuvent être exposés à différents types d'attaques qui peuvent engendrer un dysfonctionnement du réseau. Ces attaques exploitent l'incertitude du canal de communication et le déploiement aléatoire des nœuds capteurs dans des zones inaccessibles. Garantir la sécurité de ce type de réseau est ainsi une tâche difficile, puisque les nœuds possèdent des capacités matérielles limitées. Le cas échéant,

utiliser des protections physiques est, dans beaucoup de situations, quasiment impraticable. Il est donc nécessaire de vérifier la sécurité via son protocole de fonctionnement [12]

Confidentialité des données: Assurer que seuls les nœuds autorisés peuvent accéder au contenu des messages.

Authentification: Assurer que les données sont bien issues de la source indiquée.

Intégrité des données: Assurer qu'aucune donnée reçue n'a été modifiée par des nœuds non autorisés.

Fraicheur des données: Assurer que les anciens messages ne recerclent plus sur le réseau.

Disponibilité: Assurer que les services offerts par le réseau ou par un seul nœud sont disponibles.

11 Problèmes liés aux réseaux de capteur sans fil :

Plusieurs facteurs influencent l'architecture des réseaux de capteurs et leurs protocoles de routage à implémenter tels que [13] :

11.1 Consommation d'énergie :

L'économie d'énergie est l'une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs car la recharge des sources d'énergie est parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum leur énergie pour fonctionner le plus longtemps que possible. C'est pourquoi des algorithmes et des protocoles ont été développés dont leur principal souci est l'économie d'énergie.

11.2 Localisation :

Le GPS est l'un des systèmes de localisation disponible sur toute la surface de la terre. Cependant, il reste une solution coûteuse. De plus, la

réception du signal est très gourmande en énergie, ce qui réduit la durée de vie des batteries. Le développement de nouvelles techniques de localisation est devenu un grand souci pour les réseaux sans fil de capteurs tels que l'estimation de la distance entre nœuds, et la triangulation.

11.3 Environnement :

Les capteurs doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des conditions sévères : sous la haute pression au fond de l'océan, dans des champs chimiquement souillés ou même dans des milieux extrêmement froids.

11.4 La durée de vie :

C'est la durée pendant laquelle le réseau reste opérationnel. Le RCSF doit fonctionner au moins jusqu'à accomplir une tâche donnée. Cette durée est en relation directe avec le fonctionnement efficace du réseau en termes de la conservation d'énergie.

11.5 La sécurité :

La sécurité est un problème critique pour certaines applications. Le réseau devrait donc permettre la détection des intrusions. L'écoute, le brouillage, et les attaques de retransmission peuvent entraver ou empêcher le bon fonctionnement du réseau. il donc indispensable de contrôler l'accès aux nœuds, l'intégrité de leurs messages, et leur confidentialité.

11.6 Agrégation des données :

Plus le capteur transmet des données plus loin, et par conséquent il augmente sa puissance d'émission, plus il consomme de l'énergie, et réduit sa durée de vie. Il donc nécessaire de réduire le nombre de paquets à transmettre par des techniques d'agrégation. Ces techniques sont souvent utilisées. Cependant, elles sont difficiles à mettre en œuvre lorsque les données sont chiffrées.

11.7 Topologie dynamique :

La topologie du RCSF change fréquemment à cause des défaillances des nœuds ou l'ajout de nouveaux nœuds. Le changement de la topologie peut engendrer des problèmes de dis-connectivité et la perte d'énergie, il est donc nécessaire de mettre en place des techniques de maintenance du réseau dans sa phase du post-déploiement.

12 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), leurs architectures, composants, l'architecture de communication, caractéristiques ainsi que les problèmes des réseaux de capteur et quelques domaines d'application de ces derniers. Dans le chapitre qui suit, nous présentons quelques protocoles de routage classique conçus pour les RCSF et d'autres améliorations proposées.



***CHAPITRE 02 : LE ROUTAGE
DANS LES RCSFs***

1 Introduction :

Le protocole de routage est un processus permettant de sélectionner le chemin approprié pour que les données voyagent de la source à la destination. Le processus rencontre plusieurs difficultés lors de la sélection de la route, qui dépend du type de réseau, des caractéristiques du canal et des mesures de performance. Dans les petits réseaux de capteurs où la station de base et les nœuds sont si proches, ils peuvent donc communiquer directement entre eux. Il s'agit d'une communication à saut unique, mais dans la plupart des applications des RCSFs, la zone de couverture est si grande et elle nécessite la mise en place de milliers de nœuds et ce scénario nécessite une communication multi-sauts car la plupart des nœuds capteurs sont si éloignés du nœud récepteur (passerelle) et ils ne peuvent pas communiquer directement avec la station de base.

Dans ce chapitre nous allons décrire dans un premier lieu, les protocoles de routage des RCSFs en citant quelques exemples. Dans un deuxième lieu, nous allons exposer en détail deux protocoles de routage hiérarchique des RCSFs qui assurant l'efficacité énergétique. Le LEACH qui est l'un des premiers protocoles de routage basé clustering. Il est également considéré comme la base de plusieurs autres protocoles de routage récemment proposés et dans un second lieu nous allons détailler le protocole SEP qui est la base de notre contribution.

2 Le routage :

Le routage est le mécanisme par lequel un chemin est déterminé dans le réseau pour transmettre les données d'un nœud source jusqu'à un ou plusieurs destinataires. [14]

3 Protocole de routage :

Le protocole de routage est la partie logicielle de la couche réseau de la pile qui permet aux données d'atteindre leur destination finale de la manière la plus

efficace. Il fonctionne en vérifiant les itinéraires optimaux, en créant des tables de routage et en décidant des itinéraires pour le trafic existant. Il existe différents types de protocoles de routage qui sont légèrement différemment [19]. Nous présentons ci-dessous quelques exemples avec leur classification.

4 Classification des protocoles de routage des RCSFs :

Les protocoles de routage proposés dans la littérature pour les RCSFs peuvent être classifiés selon : la topologie du réseau, le fonctionnement du protocole, les paradigmes de communication, l'établissement de la route, la mobilité, l'hétérogénéité et la couche réseau [41]:

4.1 La topologie du réseau :

Dans cette catégorie, il existe trois classes principales : le routage hiérarchique, le routage plat et le routage géographique (localisation).

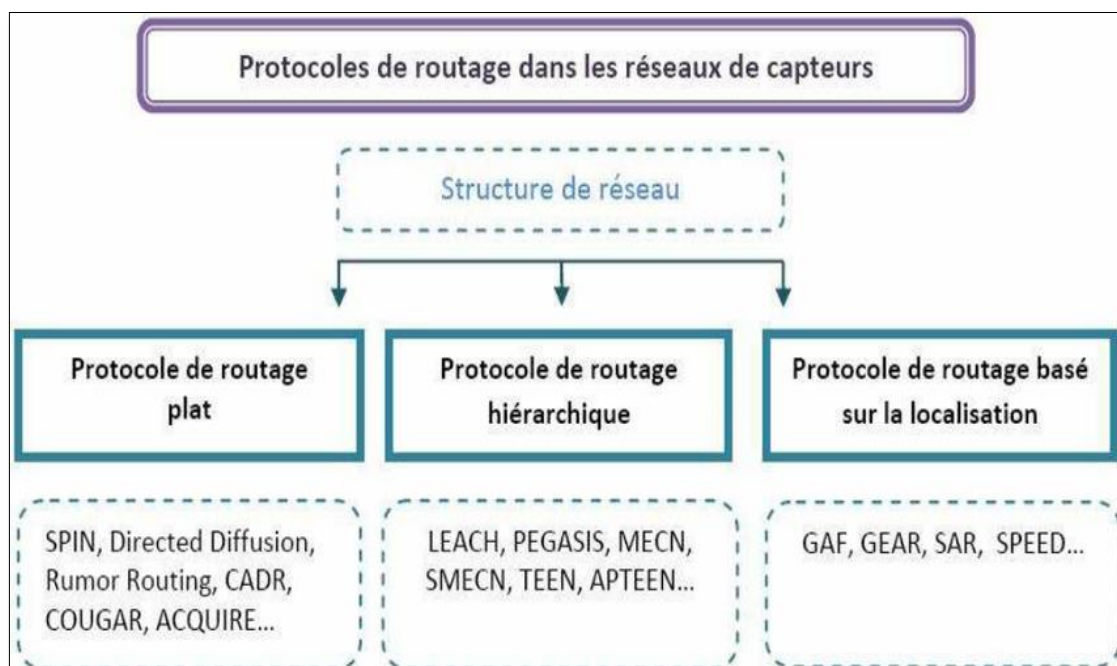


Figure 2.1 : taxonomie de la topologie de réseau [18]

4.1.1 Les protocoles hiérarchiques :

Dans les protocoles à topologie hiérarchique, le Sink (le plus haut niveau de la hiérarchie) est relié avec une liaison point à point à plusieurs nœuds du deuxième niveau dans la hiérarchie. Chacun des nœuds du deuxième niveau aura également un ou plusieurs autres nœuds du troisième niveau dans la hiérarchie reliée à lui avec une liaison point à point. Chaque ensemble de nœuds reliés à un nœud du plus haut niveau forme un Cluster. Les nœuds du deuxième niveau jouent le rôle des passerelles entre ceux du troisième niveau et le Sink.

LEACH, PEGASIS, MECN, SMECN, TEEN, APTEEN, ... sont des exemples des protocoles hiérarchiques [21]

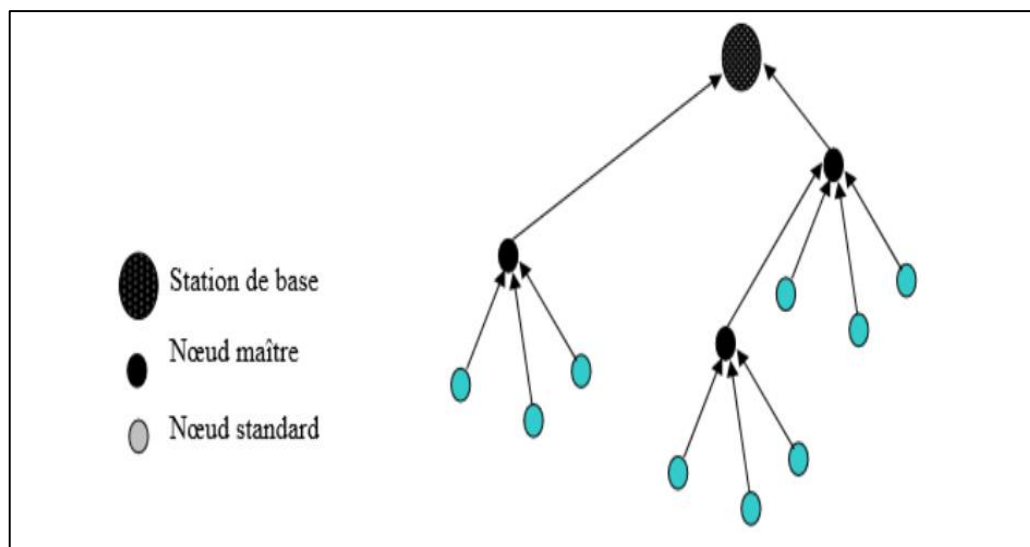


Figure 2.2 : Le routage hiérarchique [22]

4.1.1.1 Le protocole LEACH :

Les protocoles de routage conventionnels, tels que la transmission directe, l'énergie de transmission minimale, le routage multi-sauts et le clustering ont tous des inconvénients qui ne leur permettent pas d'atteindre toutes les propriétés souhaitables. LEACH comprend la formation de clusters distribués, le traitement local pour réduire la communication globale et la rotation aléatoire des chefs de cluster. Les simulations de ce protocole

montrent que LEACH est un protocole économe en énergie et prolonge la durée de vie du réseau. [23]

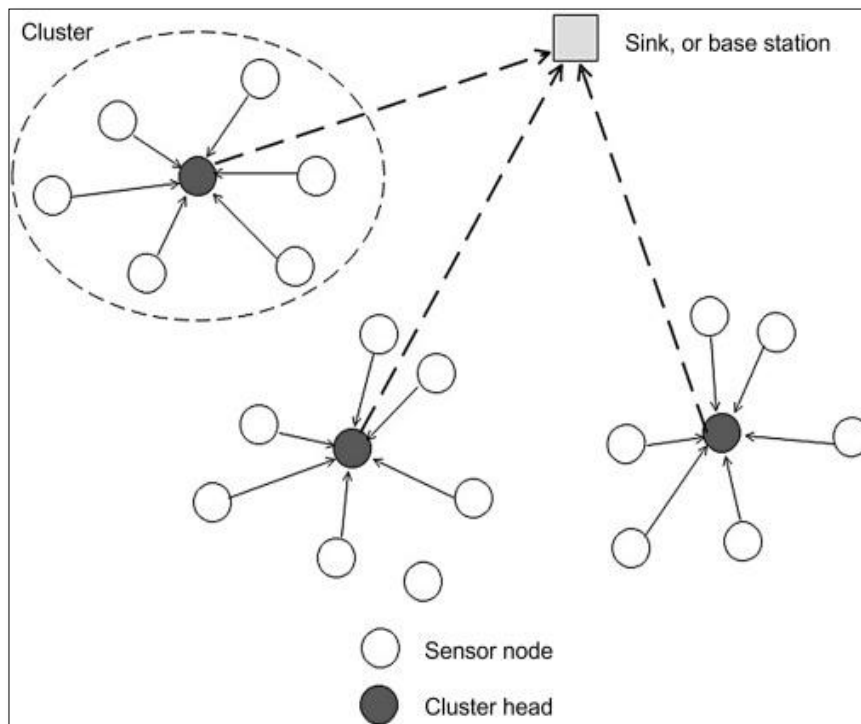


Figure 2. 3 : Architecture du routage hiérarchique LEACH

Dans LEACH, chaque round est constitué de deux phases : la phase d'initialisation où les clusters avec leur chef de clusters sont déterminés, et dans la seconde phase qui est la phase de communication : les données seront transmises suivant un modèle énergétique.

4.1.1.1 La phase d'initialisation :

Le but de cette phase est la construction des clusters après la sélection des chefs de clusters.

Cette phase commence par une prise de décision locale pour devenir cluster-chef. Chaque nœud n choisit une valeur aléatoire entre 0 et 1, si cette valeur est inférieure à un seuil $T(n)$, le nœud devient cluster-chef (CH).

$T(n)$ est définie comme suit :

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

Avec:

P: pourcentage désiré de cluster-chefs.

n : identificateur du nœud.

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

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu comme cluster-chef émet un message de notification. Les nœuds les plus proches en fonction de l'amplitude du signal reçu récoltent le message de notification, et décident leur appartenance au cluster le plus proche. En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision. Toutes les communications précédentes sont faites par la méthode CSMA. Par la suite, les communications au sein d'un cluster sont faites avec la méthode TDMA. Pour cela, chaque chef établit un Schedule TDMA pour ses membres, en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission [7].

Le schéma ci-dessus est une présentation graphique des étapes de la phase d'initialisation du protocole LEACH. [7]

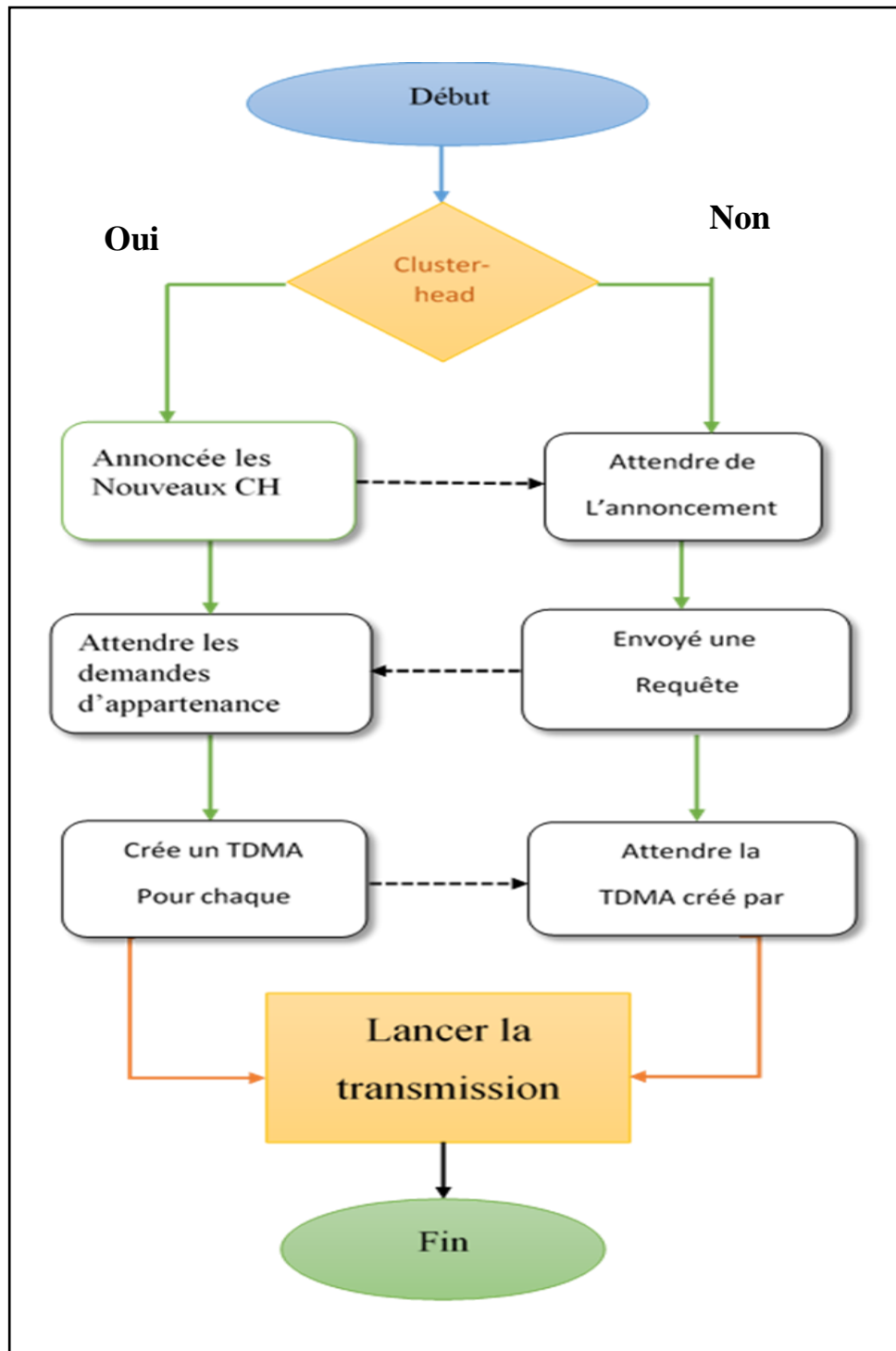


Figure 2.4 : opérations de la phase d'initialisation [24]

4.1.1.1.2 La phase de communication :

Les nœuds membres émettent leurs données pendant leurs propres slots suivant le Schedule TDMA établie par leur chef de cluster. Cela leur permet d'être en veille en dehors de leurs slots réservés pour économiser leur énergie. Les

informations reçues sont ensuite agrégées par le chef cluster et puis transmis à la station de base [25].

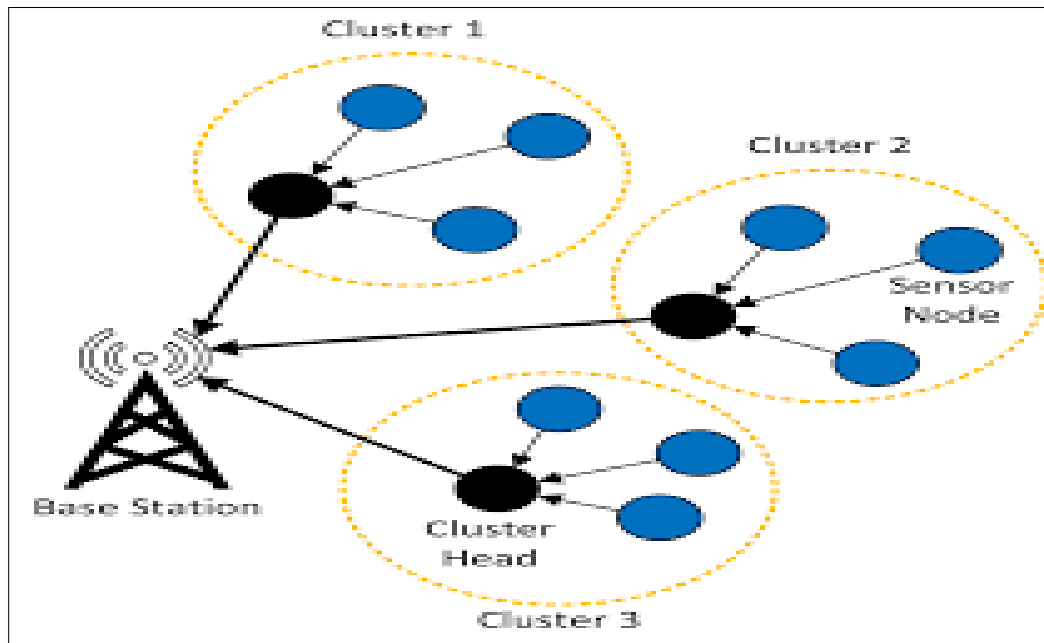


Figure 2. 5 : Transmission des données à la station de base

4.1.1.2 Le protocole de routage HEED :

HEED est un protocole distribué et basé clustering pour le routage des RCSFs. A l'inverse des techniques de routages précédentes, HEED ne dépend ni de la topologie du réseau, ni de sa taille et ne fait pas de restriction sur la distribution et la densité des nœuds mais et il suppose que les capteurs sont capables d'ajuster leurs puissances de transmission. Dans HEED, les CHs sont élus en fonction de l'énergie résiduelle et le degré des nœuds. Il vise ainsi à réaliser une distribution uniforme des CHs dans le réseau pour maintenir la connectivité de l'ensemble des nœuds avec leurs CHs [26].

4.1.1.3 Le protocole de routage « TEEN et APTEEN » :

En utilisant TDMA, le protocole LEACH est destiné aux applications time-driven. Dans ce type d'application, la donnée est propagée d'une manière périodique. Cependant, ce genre de protocole est inadapté pour les applications event-driven, où un comportement réactif est indispensable.

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) a modifié LEACH afin de répondre aux exigences des applications event-driven. TEEN est sensible aux changements brusques des attributs tels que la température. TEEN est un protocole hiérarchique comme LEACH. Cependant, quelques différences existent. Les chefs cluster ne se basent pas sur le protocole TDMA dans leurs communications avec les nœuds membres, mais émettent des messages contenant les informations suivantes [42]:

- Attributs : représentent la tâche demandée au capteur.
- Hard threshold (HT) : détermine la valeur critique après laquelle les membres doivent envoyer leur rapport de données.
- Soft threshold (ST) : spécifie le changement minimal obligeant le nœud à envoyer un nouveau rapport. Donc, lorsqu'un nœud s'aperçoit que la valeur captée a dépassé HT, il doit émettre un rapport au chef. Il ne réémet un nouveau rapport que si la valeur change radicalement.

Ce mécanisme permet d'implémenter un comportement réactif, tout en limitant le nombre de messages utilisés.

APTEEN est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection périodique de données et qui réagit aux événements critiques. [25]

4.1.1.4 Protocole PEGASIS :

Contrairement à LEACH, PEGASIS évite la formation des clusters et procure à la formation d'une chaîne entre les nœuds capteurs où chaque nœud transmet et reçoit les données de son voisin le plus proche. Les données collectées sont transmises d'un nœud à un autre jusqu'à ce qu'elles arrivent à la station de base.

Ce principe de construction d'une chaîne rend PEGASIS inadapté aux architectures avec nœuds mobiles.

Un autre protocole de routage centralisé appelé Hiérarchical PEGASIS a été conçu afin de l'améliorer. Dans H PEGASIS, la chaîne est divisée en clusters où chaque nœud capteur communique avec un seul nœud voisin du niveau plus bas de la hiérarchie. Les transmissions simultanées en parallèle dans les différents clusters rendent H PEGASIS une version améliorée de LEACH [26]

4.1.2 Les protocoles plats :

Dans une topologie plate, tous les nœuds capteurs possèdent le même rôle dans la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par : la simplicité, la tolérance aux pannes. Cependant, Les nœuds proches du puits épuisent leur énergie plus rapidement que les autres nœuds, et présentent une faible scalabilité. La figure suivante illustre un exemple d'une topologie plate. [17]

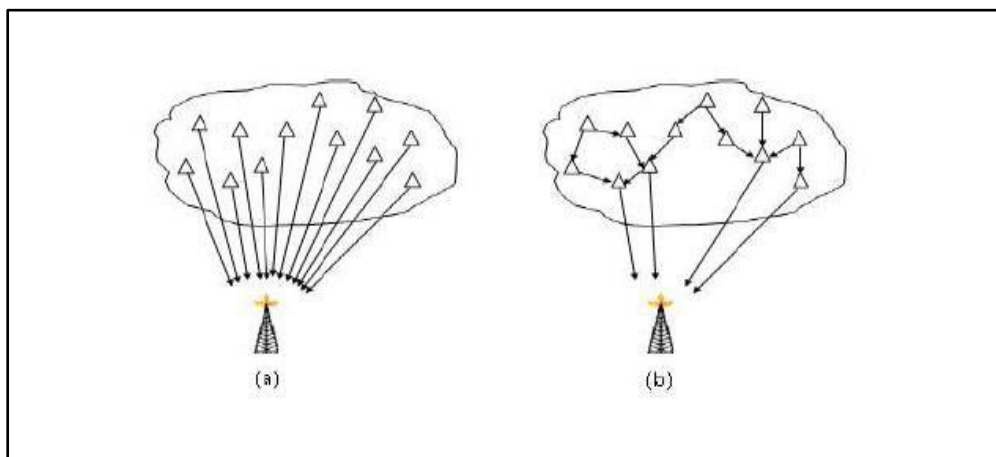


Figure 2.6 : le routage plat

4.1.2.1 Le protocole de routage SPIN :

Le fonctionnement du protocole SPIN a été mis en place pour résoudre le problème d'inondation par messages connus dans les méthodes de diffusion traditionnelles. Le protocole SPIN utilise trois types de paquets pour communiquer ADV/REQ/DATA respectivement pour advertises new data,

requests data et le message actuel. Si un nœud voulant émettre une donnée commence par envoyer un paquet ADV. Ce paquet ADV contenant des méta-données sur les données à émettre. Les méta-données contiennent la description des données en question. Les nœuds qui reçoivent le paquet ADV vérifient si les données les intéressent. Si c'est le cas, ils répondent par un paquet REQ pour demander les données. Le nœud qui a initié la communication envoie alors un paquet DATA pour chaque réponse REQ reçue. [21]

4.1.2.2 Le protocole DD :

Dans le protocole Directed diffusion, le puits diffuse une requête dans le réseau pour des données particulières et puis établit des gradients par propagation des intérêts et choisit la meilleure route par renforcement de chemins [7].

4.1.3 Les protocoles géographiques :

Ce type de protocoles est basé sur les positions géographiques des nœuds. L'information est propagée d'un nœud à son voisin direct et ainsi de suite jusqu'à parvenir au nœud de destination.

Parmi les protocoles de routage géographique on cite: GAF, GEAR, MECN et SMECN.

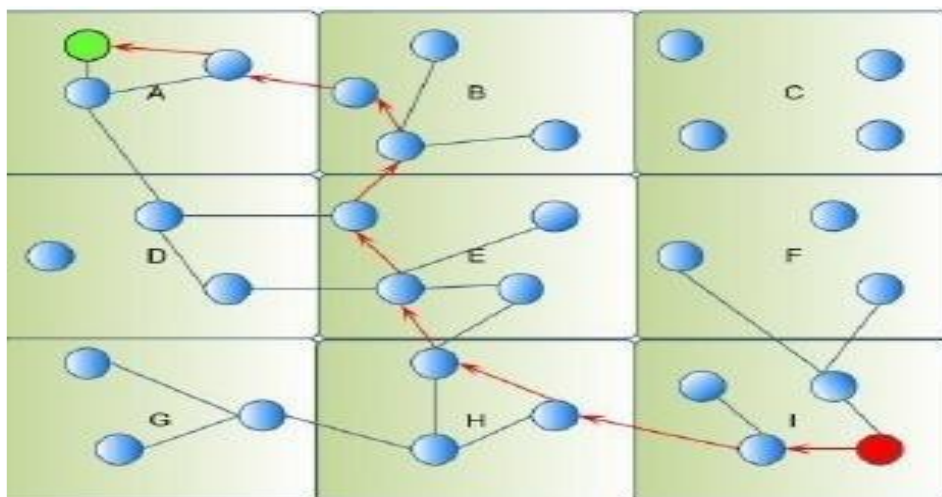


Figure 2.7 : protocole géographique [27]

4.1.3.1 Le protocole de routage GEAR :

Le protocole GEAR découpe le réseau en régions. Dans GEAR le paquet de donnée porte la région destination et le nœud voisin de cette région en fonction de sa position et son énergie résiduelle ; un lien est établi entre 2 nœuds lorsqu'ils sont à portée et leur niveau d'énergie leur permet de se communiquer [17].

4.1.3.2 Le protocole de routage MECN et SMECN :

MECN, est basé sur GPS à basse puissance. MECN recherche le sous-réseau ayant moins de nœuds et exigeant moins de puissance pour la communication. SMECN (Small MECN) est une extension de MECN. Le sous-réseau construit par SMECN est plus petit en termes de nombre d'arcs par rapport à celui construit par MECN. [28]

4.1.3.3 Le protocole de routage GAF :

GAF est protocole conçu au départ pour le routage des réseaux ad-hoc mobiles. Il garantit une faible consommation d'énergie en mettant en veille les nœuds qui ne sont pas impliqués dans le processus de routage. Dans GAF, chaque nœud via GPS connaît sa position et les positions de ses voisins sur une grille virtuelle. Dans chacune des zones de la grille, il n'existe qu'un nœud principal qui transmet les données vers les autres nœuds, ce nœud principal diffère du nœud cluster-chef des protocoles hiérarchique car il ne fait pas d'agrégation des données. [25]

4.1.3.4 Le protocole de routage SPEED :

SPEED tente d'assurer une certaine vitesse de relais des nœuds voisins en termes de leurs distances géographiques. SPEED fournit un moyen d'éviter les zones congestionnées lors de l'acheminement des paquets en utilisant des messages de contre pression. Ces messages sont envoyés par les nœuds congestionnés à leurs nœuds ascendants pour choisir autres chemins alternatifs. SPEED par rapport à autres protocole assure un meilleur délai de bout en bout, et meilleur taux de livraison de paquets. Cependant, SPEED ne prend pas en considération la métrique d'énergie dans ses décisions. [29]

4.2 Taxonomie selon le fonctionnement du protocole :

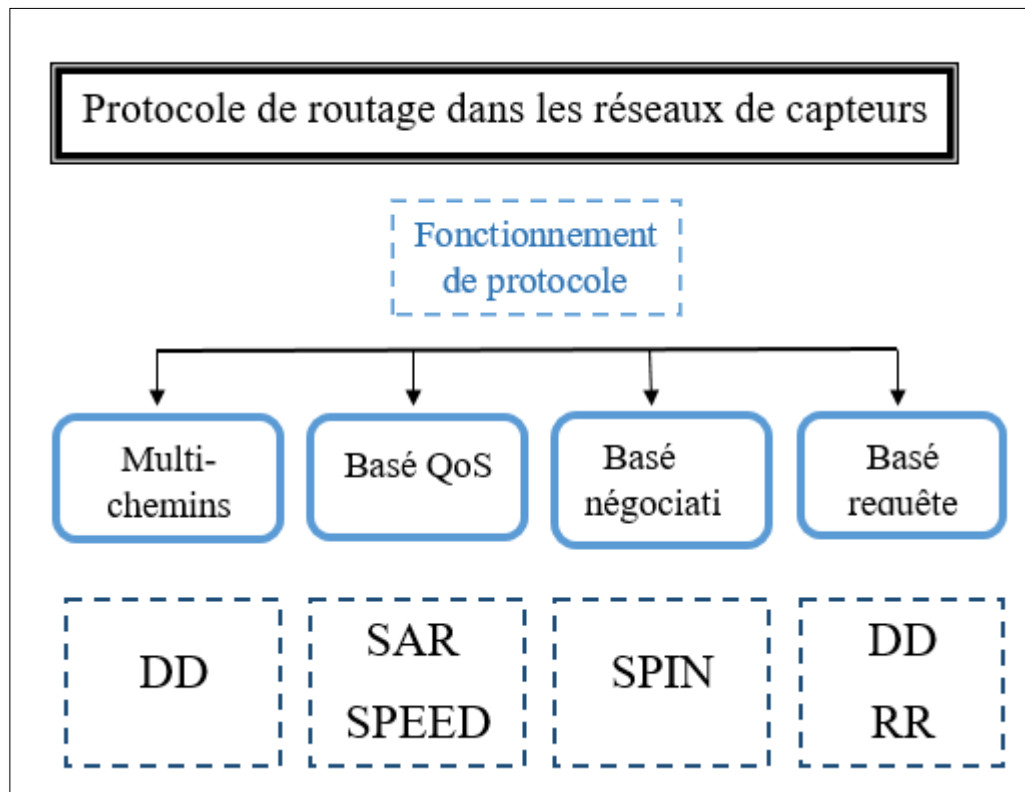


Figure 2.8 : Taxonomie selon le fonctionnement de protocole

4.2.1 Protocole basé sur la QoS :

Dans les protocoles de routage basés sur la qualité de service (QoS), le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, telles que, le retard, l'énergie, la largeur de la bande passante, etc. [17]

4.2.2 Routage basé sur la négociation :

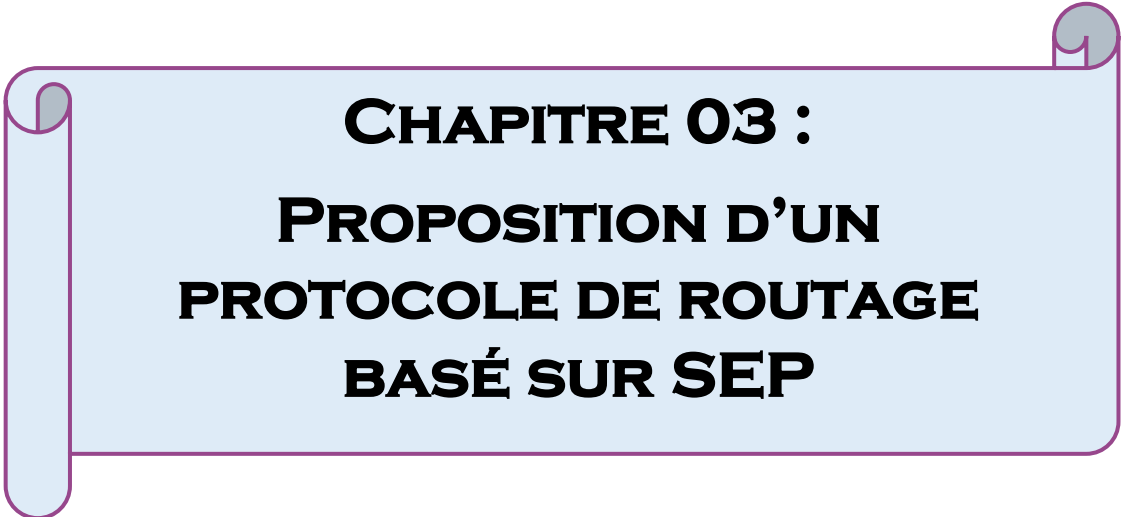
Dans un protocole de routage basé négociation, les nœuds capteurs négocient avec leurs voisin les données à transmettre en échangeant des paquets de signalisation pour éliminer la redondance des données. Parmi ces protocoles, on cite : **SPIN** (Sensor Protocols for Information via Négociation) [20].

4.2.3 Routage basé requête (interrogation) :

Dans un protocole basé requête, la station de base envoie des requêtes demandant certaines données des nœuds du réseau, les nœuds ayant les données demandées les envoient directement à la station de base, parmi ces protocoles on cite : **DD** (direct diffusion). [25]

5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu aborder les techniques de routage au niveau des réseaux de capteurs sans fil, nous avons également fait une étude détaillée des critères de classification des protocoles de routage. Ces protocoles de routage ont été classifiés selon plusieurs critères, parmi ces critères: la structure du réseau, le paradigme de communication, et selon le fonctionnement des protocoles, etc. Chaque critère regroupe plusieurs catégories et certains de ces protocoles peuvent appartenir à une ou plusieurs catégories de routage. L'objectif de la plupart des protocoles est d'optimiser la consommation d'énergie afin d'assurer une durée de vie plus longue au réseau ainsi que d'éviter la redondance des paquets.



CHAPITRE 03 :
PROPOSITION D'UN
PROTOCOLE DE ROUTAGE
BASÉ SUR SEP

1 Introduction :

Dans ce travail, la méthode d'optimisation par essaim de particules binaire a été introduite dans la phase de sélection de CHs dans le processus de routage d'un réseau de capteurs hétérogène. Ce travail peut être considéré comme protocole SEP modifié dans le sens où le réseau considéré est constitué des nœuds normaux et un pourcentage de nœuds avancés, en plus, la sélection des cluster-chef se fait d'une façon similaire à celle de SEP. Dans SEP le rôle d'être un CH est alterné entre les nœuds par des équations probabilistes prenant en compte le type de nœuds (avancé ou normal), le pourcentage souhaité de cluster-chef, l'ensemble de nœuds non élus comme CH et le nombre de rounds effectuées. Dans ce travail, la sélection de CHs est basée sur BPSO en fonction du nombre de CH et de leurs énergies initiales, l'objectif est de trouver le meilleur ensemble de CHs en basé sur une fonction objective dont sa maximisation favorise les CHs ayant plus d'énergie initiale d'une façon similaire au protocole SEP. La méthode BPSO est ainsi utilisée pour la sélection d'un nombre indéterminé de CHs et le protocole proposé reste hiérarchique dans le sens où chaque CH reçoit les messages internes de ses membres de groupe, agrège les paquets similaires et agit comme une passerelle avec les autres CHs. La phase de communication est la même que celle du protocole SEP.

Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu, décrire les étapes du protocole proposé.

2 Le protocole SEP (Stable election protocol)

2.1 Définition :

SEP est un protocole hiérarchique hétérogène à deux niveaux d'énergie : des nœuds normaux avec énergie initiale E_0 et des nœuds avancés ayant plus d'énergie : $E_0 \cdot (1+a)$ avec « a » une valeur réelle positive.

Dans SEP, la sélection de CHs est basée sur leurs énergies initiales. Il consiste à attribuer une probabilité de sélection comme CH à chacun des nœuds du réseau.

Le protocole SEP a prolongé l'intervalle de temps entre le début du fonctionnement du réseau et temps de la mort du premier nœud (appelée période de stabilité), ce qui est crucial pour de nombreuses applications [31].

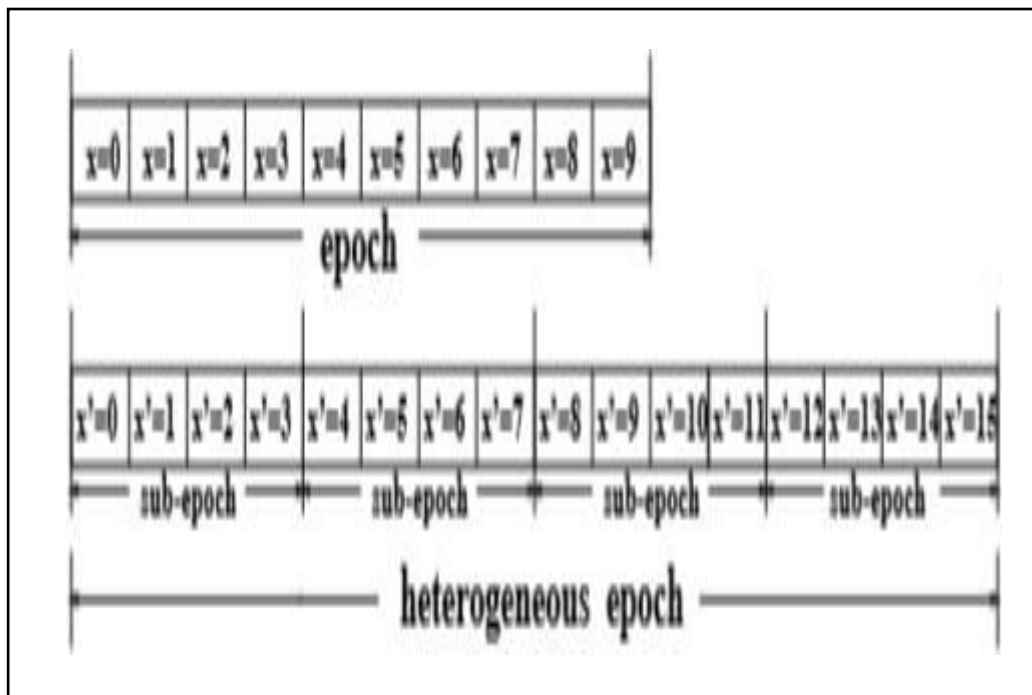


Figure 3. 1 : Time Line operation de SEP

2.2 Le fonctionnement du protocole SEP :

Dans SEP, les probabilités pour la sélection de CHs donnent plus de chances aux nœuds avancés de devenir un CH en diminuant leur intervalle des rounds CH par rapport aux nœuds normaux comme présentés ci-dessous [32], [33]:

$$P_{norm} = \frac{P}{1 + a.m} \quad (1)$$

$$P_{advan} = \frac{P}{1 + a.m} * (1 + a) \quad (2)$$

m : est le pourcentage des nœuds avancés

La valeur de seuil dépend aussi de la probabilité du nœud.

Ainsi, pour chaque nœud S un nombre aléatoire entre 0 et 1 est généré, si cette valeur est inférieure à son seuil correspondant, alors ce nœud deviendra un CH.

Le calcul du seuil des nœuds normaux et avancés est indiqué respectivement par les équations suivantes [32]:

$$T(S_{norm}) = \begin{cases} \frac{P_{norm}}{1 - P_{norm} * \left(r \bmod \frac{1}{P_{norm}}\right)}, & \text{if } S_{norm} \in G' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$T(S_{advan}) = \begin{cases} \frac{P_{advan}}{1 - P_{advan} * \left(r \bmod \frac{1}{P_{advan}}\right)}, & \text{if } S_{advan} \in G'' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Où, r est le tour actuel, G' est l'ensemble des nœuds normaux et G'' est l'ensemble des nœuds avancés qui ne sont pas choisis comme CH dans le dernier $\frac{1}{P_{norm}}$ et $\frac{1}{P_{advan}}$ rounds respectivement.

Après la sélection des CHs, le protocole lance la phase de communication qui est la même que celle de LEACH.

2.3 Les lacunes de l'algorithme SEP :

La notion de positions de CHs n'est pas prise en compte dans SEP, Les chef de cluster ne seront pas donc uniformément réparti, et la méthode de clustering basé sur l'intensité du signal rend le nombre de nœuds aléatoire dans chaque cluster.

Dans l'algorithme SEP, la probabilité d'élection de CHs n'est pas liée à l'énergie résiduelle ; après un certain nombre de rounds, l'énergie résiduelle du nœud avancé peut ne pas avoir l'énergie résiduelle du nœud ordinaire, et sa probabilité de devenir un CH reste supérieure à celle du nœud ordinaire. Cela accélère la mort de certains nœuds avancés et réduit le temps de survie global du réseau.

L'algorithme SEP est utilisé en mode de transmission à saut unique, une telle transmission si éloignée des nœuds avancés dépense beaucoup d'énergie pour les longues distances, ce qui mène à la mort prématurée des nœuds avancés et réduit la durée de survie du réseau [34]

3 Le protocole TSEP (Threshold sensitive Stable Election

Protocol):

Le TSEP est un SEP à trois niveaux où la transmission ne se fait que lorsqu'un seuil spécifique est atteint,

Le réseau est ainsi constitué des Nœuds normaux, des nœuds intermédiaires et nœuds avancés, l'énergie pour les nœuds normaux est E_0 , pour les nœuds avancés elle est $E_{advan} = E_0 \cdot (1 + a)$ et pour les nœuds intermédiaires elle est

$$E_{interm} = E_0 \cdot (1 + \mu) \quad \text{où} \quad \mu = \frac{a}{2} \quad [35].$$

La sélection des CH est basée sur les de probabilités des nœuds données par les formules suivantes [35]:

$$P_{norm} = \frac{P}{(1 + a.m + b.\mu)}$$

$$P_{interm} = \frac{P.(1 + \mu)}{(1 + a.m + b.\mu)}$$

$$P_{advan} = \frac{P.(1 + a)}{(1 + a.m + b.\mu)}$$

Ainsi, pour chaque nœud une valeur entre 0 et 1 est générée aléatoirement, et si cette valeur est inférieure à son niveau de seuil correspondant, le nœud devient un CH,

le niveau de seuil dépend de chaque type de nœuds comme décrit dans les formules suivantes [35]

$$T(S_{norm}) = \begin{cases} \frac{P_{norm}}{1 - P_{norm} * \left(r \bmod \frac{1}{P_{norm}}\right)}, & \text{if } S_{norm} \in G' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$T(S_{interm}) = \begin{cases} \frac{P_{interm}}{1 - P_{interm} * \left(r \bmod \frac{1}{P_{interm}}\right)}, & \text{if } S_{interm} \in G'' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$T(S_{advan}) = \begin{cases} \frac{P_{advan}}{1 - P_{advan} * \left(r \bmod \frac{1}{P_{advan}}\right)}, & \text{if } S_{advan} \in G''' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

G' , G'' et G''' sont respectivement l'ensemble des nœuds normaux, intermédiaires et avancés qui n'ont pas été sélectionnés comme CH.

Un CH diffuse quatre paramètres

- Heure de rapport (TR)

- Attributs (A)
- Seuil dur (HT)
- Seuil souple (ST), c'est sur la base de ces paramètres que le CH décide ou non de transmettre des données à la station de base [35].

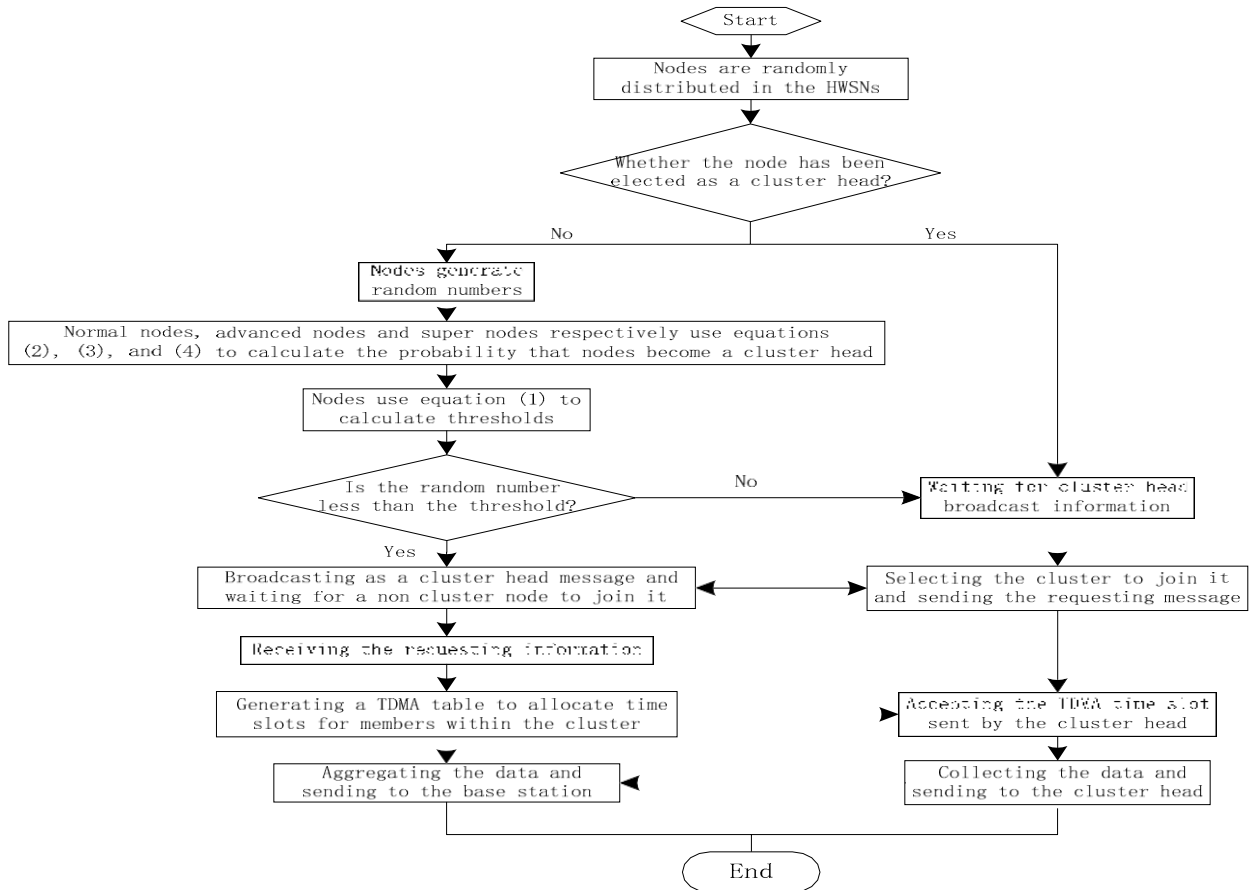


Figure 3.2 : L'organigramme de l'algorithme du protocole d'élection stable sensible au seuil (TSEP).[36]

3.1 Le modèle énergétique

La mise à jour de l'énergie des nœuds après chaque émission ou réception d'un paquet de donnée « pk » est basé sur le modèle énergétique du radio résumé dans les équations ci-dessous [37]

$$E_{Tx}(pk, d) = \begin{cases} pk \times E_{elec} + pk \times e_{fs} \times d^{(2)} & \text{si } d < d_0 \\ pk \times E_{elec} + pk \times e_{mp} \times d^{(4)} & \text{si } d > d_0 \end{cases}$$

$$E_{Rx}(pk) = pk \times E_{elec}$$

Où

E_{Tx} et E_{Rx} sont les énergies dissipées lors de la transmission ou réception d'un paquet de donnée respectivement.

E_{elec} , E_{fs} et E_{mp} sont respectivement l'énergie du circuit électronique (E_{elec}), de l'amplificateur (E_{mp}) en espace libre et en multi-trajets (E_{fs}), et d_0 est un seuil de distance.

4 L'optimisation par essaim de particules PSO :

4.1 Définition :

L'optimisation par essaim de particules (le PSO en anglais : Particle Swarm Optimization) est un méta heuristique à base population de solutions. Elle a été proposée en 1995 par Kennedy et Eberhart [38]. L'algorithme PSO est inspiré du déplacement en groupe d'animaux, tels que les bancs de poissons ou le vol d'oiseaux. En effet, les animaux montrent un comportement de groupe complexe avec peu d'intelligence individuelle et une connaissance uniquement locale de sa situation dans l'essaim. Le comportement complexe est donc résultant des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim.

La méthode d'optimisation par essaim particulaire utilise un ensemble de particules (appelé essaim) pour résoudre un problème donné. Les particules de l'essaim représentent des solutions potentielles au problème traité. Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche est influencé par les trois composantes suivantes [39] (Figure 3.3):

1. Une composante physique: la particule tend à suivre sa direction de déplacement courante;
2. Une composante cognitive: la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée;
3. Une composante sociale: la particule tend à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

Chaque particule i est définie par sa position $x_{id} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$ dans un espace de recherche et de sa vitesse de déplacement $v_{id} = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$

Cette particule garde en mémoire sa meilleure position personnelle et la meilleure position globale trouvée par l'essaim, notées respectivement:

$$p_{bestid} = (p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestid}, \dots, p_{bestiD})$$

$$g_{best} = (g_{best1}, g_{best2}, \dots, g_{bestd}, \dots, g_{bestD}).$$

Une particule i se déplace entre les itérations t et $t+1$, en fonction de sa vitesse et les deux meilleures positions personnelle et globale suivant l'équation suivante [38]:

$$V_{id}(t) = V_{id}(t-1) + c_1 r_1 (p_{bestid}(t-1) - X_{id}(t-1)) + c_2 r_2 (g_{bestd}(t-1) - X_{id}(t-1)) \dots (1)$$

$$X_{id}(t) = X_{id}(t-1) + V_{id}(t) \dots (2)$$

Avec :

- $x_{id}(t), x_{id}(t-1)$: la position de la particule i dans la dimension d aux temps t et $t-1$, respectivement.
- $v_{id}(t), v_{id}(t-1)$: la vitesse de la particule i dans la dimension d aux temps t et $t-1$, respectivement.
- $p_{bestid}(t-1)$: la meilleure position personnelle de la particule i dans la dimension d au temps $t-1$.
- $g_{bestd}(t-1)$: la meilleure position globale de l'essaim dans la dimension d au temps $t-1$.
- c_1, c_2 : deux constantes qui représentent les coefficients d'accélération.
- r_1, r_2 : nombres aléatoires tirés de l'intervalle $[0,1]$.

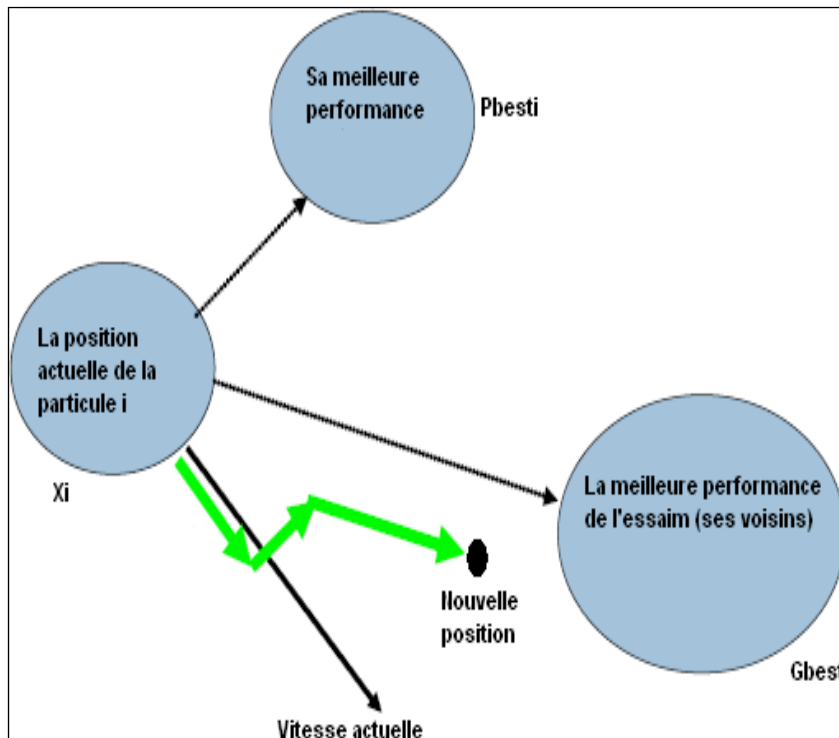


Figure 3.3 : Déplacement d'une particule

La qualité de la particule i , est la valeur de sa fonction objective (aussi appelée fitness).

La valeur de la fonction « objectif » de la particule x_{id} est notée $f(x_{id})$. Cette dernière est calculée en utilisant la fonction du problème à résoudre. Pour mettre à jour les valeurs de x_{id} , p_{bestid} et g_{bestd} , leurs fitness sont calculés à chaque itération de l'algorithme.

x_{id} est mise à jour selon l'équation (2). p_{bestid} et g_{bestd} sont mises à jour si les conditions (a) et (b) ci-dessous sont vérifiées:

1. $f(x_{id})$ est meilleur que $f(p_{bestid})$ (a)

2. $f(p_{\text{bestid}})$ est meilleur que $f(g_{\text{bestid}})$ (b)

Algorithme 3.1. L'optimisation par essaim de particules

Début

Initialiser les paramètres et la taille S de l'essaim;

Initialiser les vitesses et les positions aléatoires des particules dans chaque dimension de l'espace de recherche;

Pour chaque particule,

$p_{\text{bestid}} = x_{\text{id}} ;$

Calculer $f(x_{\text{id}})$ de chaque particule;

Calculer g_{bestd} ; // la meilleure p_{bestid}

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

Pour (i allant de 1 à S) **faire**

Calculer la nouvelle vitesse à l'aide de **l'équation (1)** ;

Trouver la nouvelle position à l'aide de **l'équation (2)** ;

Calculer $f(x_{\text{id}})$ de chaque particule;

Si ($f(x_{\text{id}})$ est meilleur que $f(p_{\text{bestid}})$) **alors**

$p_{\text{bestid}} = x_{\text{id}};$

Si ($f(p_{\text{bestid}})$ est meilleur que $f(g_{\text{bestd}})$) **alors**

$g_{\text{bestd}} = p_{\text{bestid}};$

Fin pour

Fin tant que

Afficher la meilleure solution trouvée g_{bestd} ;

Fin.

L'algorithme 3.1 : un pseudo code de l'algorithme PSO

5 L'optimisation par essaim de particules binaires (BPSO) :

BPSO est une adaptation de PSO aux problèmes binaires où chaque particule est initialisée au départ aléatoirement par des valeurs binaires (0 ou 1). Pour chaque itération, une nouvelle population est créée en utilisant les équations itératives de PSO. Ensuite les vitesses de particules trouvées par PSO seront limitées dans l'intervalle [0,1] en utilisant une fonction sigmoïde.

$$V'_{id}(t) = sig(v_{id}(t)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}(t)}}$$

et les nouvelles positions de particules seront recalculées par l'équation suivante :

$$x_{id}(t + 1) = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{id} < sig(v_{id}(t+1)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Avec r_{id} est un nombre aléatoirement choisi dans l'intervalle [0,1]

5.1 La sélection de CHs par PSO binaire :

Dans notre proposition, la méthode BPSO est utilisée pour la sélection de l'ensemble de clusters chefs optimal avec leur nombre optimal à partir de l'ensemble des nœuds capteurs du réseau. Un codage binaire des particules est ainsi employé pour représenter les clusters-chefs (CHs), « 0 » signifie que le nœud correspondant est un nœud normal, « 1 » signifie que le nœud correspondant représente un CH.

6 Représentation des particules :

Comme mentionné précédemment, chaque solution ou particule est un vecteur de valeurs binaires avec une taille égale au nombre des nœuds du réseau. La valeur du vecteur particule (1 ou 0) indique le rôle du nœud correspondant ; si la valeur associée à un nœud est à 1, alors le nœud fonctionne comme cluster chef

et si sa valeur est à « 0 », alors le nœud correspondant fonctionne comme un nœud membre d'un cluster. Chaque nœud non CH choisi son cluster en fonction de l'intensité des signaux reçus de la part des CHs. Le CH émettant la plus forte intensité est choisi par le nœud récepteur.

Un exemple de la représentation optée est montré ci-dessous pour un réseau de 10 nœuds :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0

Figure 3. 4 : représentation des particules

Dans cet exemple, les nœuds ayant IDs {1, 4, 7, 8} sont choisis pour jouer le rôle de CHs (i.e des passerelles entre nœuds et la station de base)

7 La fonction objective :

La fonction de fitness employée est la somme des énergies initiales des CHs plus le nombre de CHs.

$$F(\mathbf{Xi}) = \sum_{i=1}^{Nb^{CH}} \text{énergie initial du CH} + \text{Nombre de CHs}$$

8 Conclusion :

Dans ce chapitre, un nouveau protocole de routage des réseaux de capteurs sans fil hétérogène est proposé. Ce protocole appelé BPSO-SEP est basé sur la méthode d'optimisation par essaim de particules binaires pour traiter le problème de sélection des CHs optimaux afin de réduire la consommation d'énergie du réseau.



CHAPITRE 4 : SIMULATION

1 Introduction

Avant sa mise en place, le déploiement d'un réseau de capteurs nécessite une phase de simulation, afin de s'assurer du bon fonctionnement de tous les dispositifs. En effet, pour de grands réseaux sans fil le nombre de capteurs peut atteindre plusieurs milliers et donc un coût financier relativement important. Il faut donc réduire au maximum les erreurs de conception possibles en procédant à une phase de validation. Les réseaux de capteurs sans fil disposent des caractéristiques, comme la densité importante des nœuds, leurs autonomies énergétiques limitées et la topologie qu'ils forment, exigent des protocoles de routage spécifiques, différents de ceux déployés dans les réseaux usuels. De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère indispensable. Ces protocoles doivent tenir compte de l'aspect fonctionnel de ces réseaux tout en optimisant l'efficacité énergétique des nœuds pour prolonger la durée de vie de réseau de capteurs. Dans ce chapitre, nous présentons la plate-forme logicielle que nous avons utilisée pour l'implémentation et la simulation. Après nous montrons les résultats obtenus avec discussion et comparaison de ses performances à SEP et TSEP, les critères de performance employés sont la durée de vie du réseau, la période de stabilité du protocole et nombre de paquets délivrés à la station de base.

2 Simulation et résultats expérimentaux :

L'analyse expérimentale est réalisée à l'aide MATLAB 2018. Les résultats de la simulation ont été comparés à SEP et TSEP. Les performances de la méthode proposée ont été évaluées en termes, d'énergie résiduelle du réseau (la durée de vie du réseau), le nombre des nœuds morts et le nombre de paquets délivrés à la station de base au cours des différents tours (rounds).

2.1 Choix de simulateur MATLAB :

Notre choix de simulation se porte sur l'outil MATLAB. Développé par la société Math Works, MATLAB est optimisé pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématiques, modélisation graphique et programmation.

MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes. Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les retrouver dans un seul endroit.

La simulation du protocole proposé requiert l'utilisation et la manipulation de vecteurs, de tableaux et de matrices.

Le côté évaluation des performances quant à lui, requiert la génération de graphes, et donc l'utilisation des outils de traçage qu'offre MATLAB.

2.2 Paramètres initiaux:

Tableau 1 paramètres du réseau.

Paramètre	Valeur
Les coordonnées du sink	Sink. $x=50$, Sink. $Y=50$
Nombre des nœuds	50 et puis 100
Energie initiale de chaque nœud	0.5
Eelec (énergie 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

Tableau 2 Paramètres du BPSO

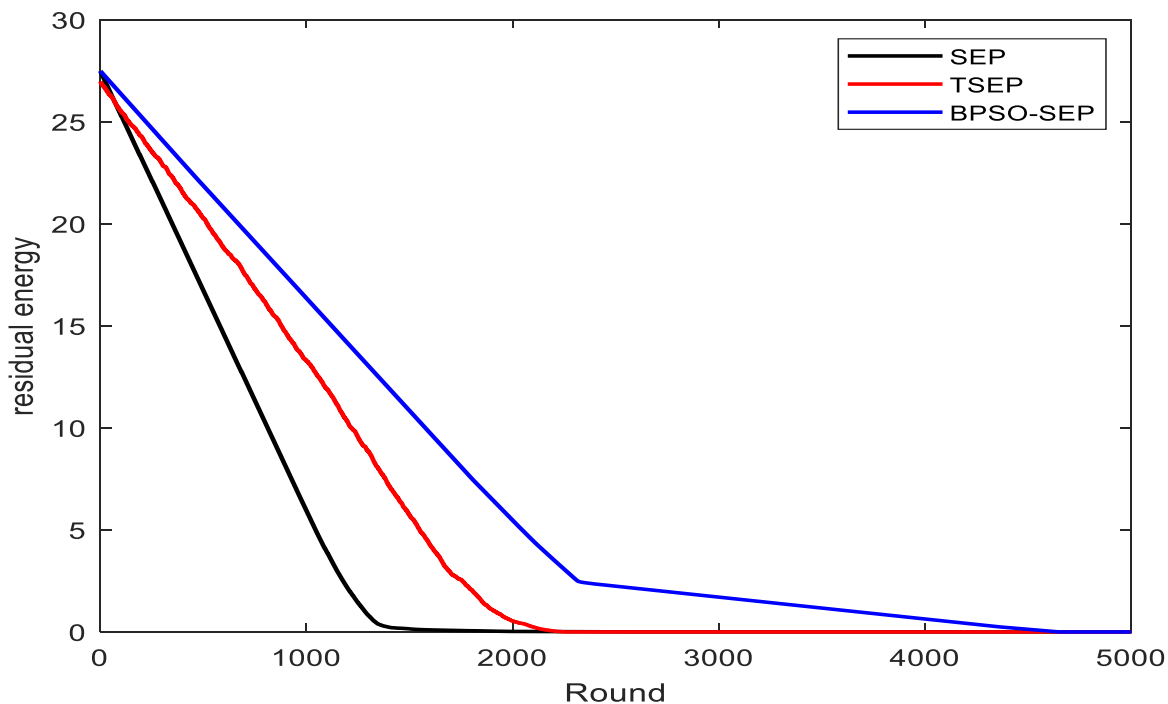
Paramètre	Valeur
Nombre de particules	20
C1=C2	1.49
W(le poids d'inertie)	0.78
Les limites de la vitesse	[-5, 5]

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.

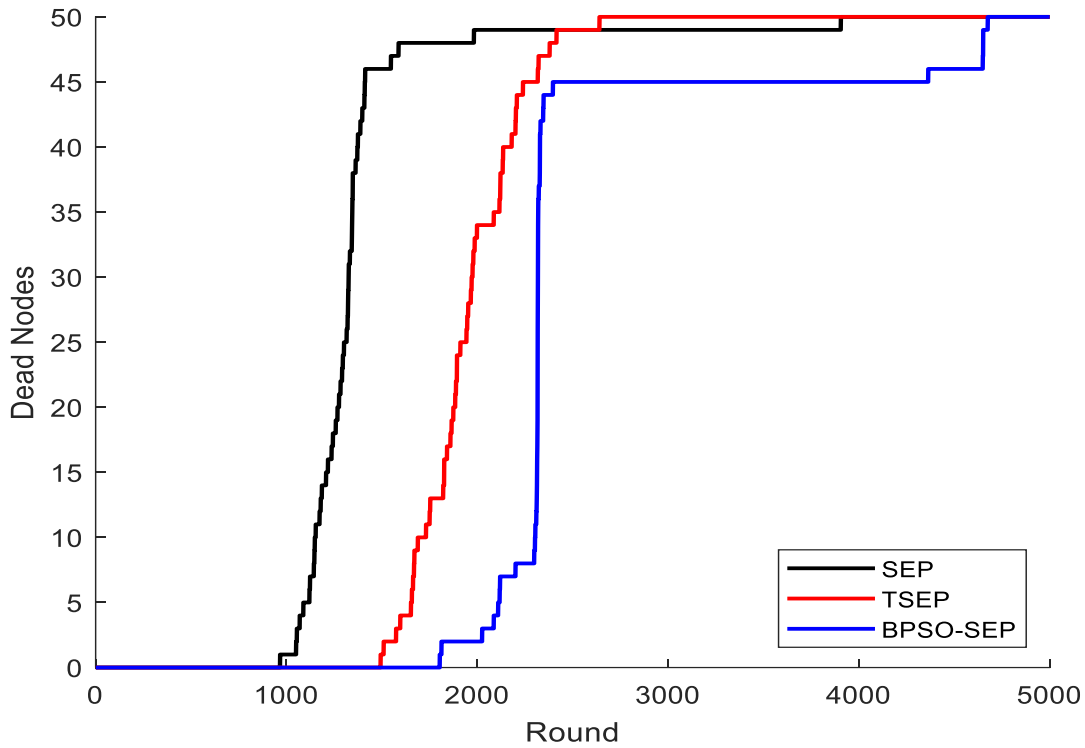
Courbes comparatives (SEP TSEP & BPSO-SEP)

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

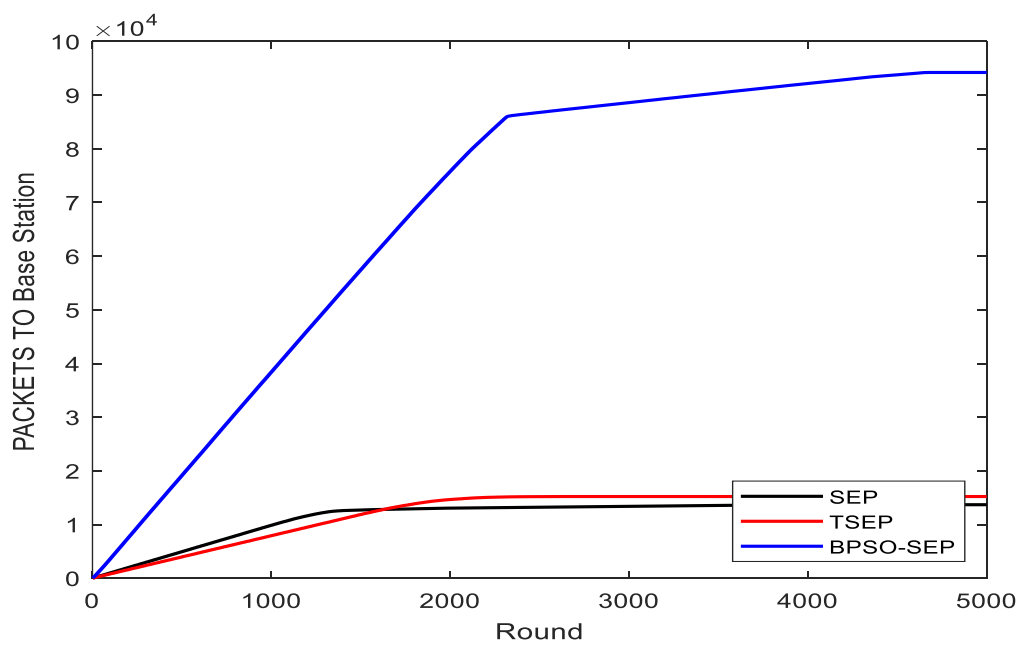
En termes d'énergie résiduelle



En termes de nœuds morts



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



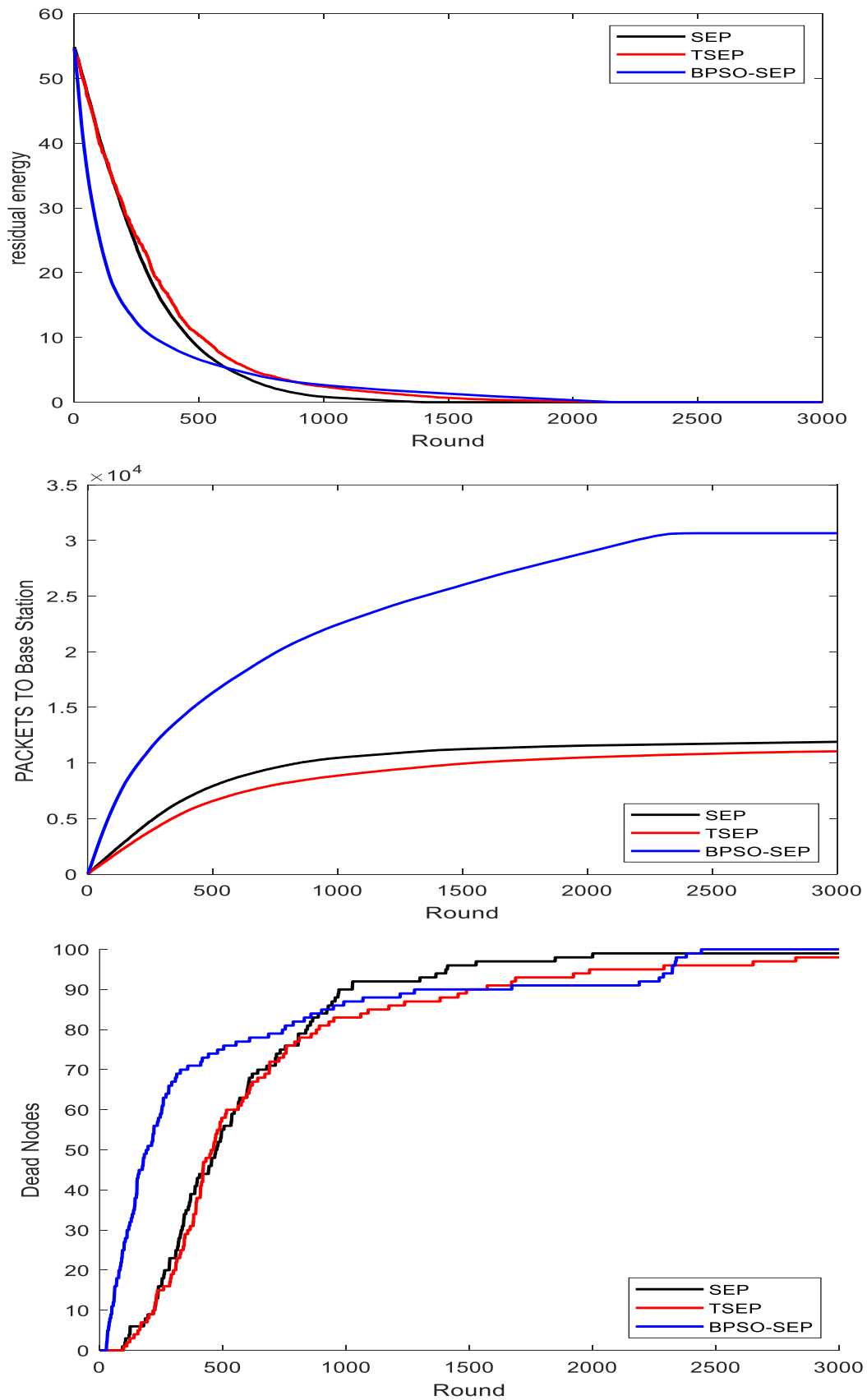
Expérience 2 : 100 nœuds dans une zone de détection 400*400 m²

Figure 4. 1: Courbes comparatifs (SEP, TSEP & BPSO-SEP)

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

Tableau 3 les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-SEP de la figure 3.5

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

Tableau 4 Les données numériques correspondantes aux courbes TSEP de la figure 3.5

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

Tableau 5 les données numériques correspondantes aux courbes SEP de la figure 3.5

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1000 1 ^{er} 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.

3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement de simulation, à savoir le simulateur MATLAB. Après, nous avons exposé les résultats obtenus avec comparaison aux protocoles hétérogènes SEP et TSEP. Les résultats trouvés ont montré l'efficacité du protocole proposé en termes de la conservation d'énergie, la quantité de données transmises à la station de base et la durée de vie de réseau.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Dans ce travail, Nous nous sommes intéressés à l'utilisation des méthodes d'optimisation par essaim et plus particulièrement la méthode d'optimisation par essaim de particules binaire dans la phase de sélection de CHs du protocole de routage des réseaux de capteurs sans fil : SEP.

La méthode proposée est donc basée clustering et utilise une fonction de fitness basée sur l'énergie initiale des capteurs dans l'étape de sélection des CHs en simulant le principe du protocole SEP, qui se base uniquement sur le type de nœuds et leur pourcentage dans leur sélection (énergie initiale). Cette fonction de fitness est utilisée comme fonction objective à maximiser par PSO binaire afin de trouver l'ensemble optimal de clusters chefs dans la phase de construction du protocole SEP. Ainsi, l'approche proposée favorise les nœuds avancés dans le processus de sélection en préférant les particules ayant une valeur de fitness maximale. La phase steady-state de l'approche proposée est la même que celle de SEP. Les résultats de la simulation ont été comparés à ceux de SEP et TSEP, la méthode proposée surpasse clairement SEP, et TSEP en termes de la durée de vie du réseau, la conservation d'énergie et le nombre de paquets délivrés à la station de base.

Bibliographie :

[1] Benazzouz, M. (2013). Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil. Magistère IRM. Ecole nationale supérieure d'informatique Oued- Smar, Alger.

[2] Diane, I. (2014). Optimisation de la consommation d'énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

[3] Cristian, D-F. (Juin 2009). Energy-efficient image transmission for wireless camera sensor networks. Université de Bio-Bio, Chili.

[4] Ghita, Gh. (2019). Réseaux de capteur sans fil. Mémoire de Master.

[5] Duvallet, C. (Décembre 2014). Les bases de données dans les réseaux de capteur sans fil. Université de Technique et Science informatique, France.

[6] Metthey, B. (2006). Simulateurs de réseaux de capteurs sans fils Université de Pau et des pays de l'Adour.

[7] Challal, Y. (2008). Réseaux de capteurs sans fil. Université de Technologie de Compiègne, France.

[8] Bounegta, N. (2010). Approche distribuée pour la sécurité d'un réseau de capteurs sans fils (RCSF). Ingénieur d'état en informatique. Université de Bechar.

- [9] Benchaoui, F. (2018). Planification d'itinéraires de protocole LEACH sur l'algorithme GRASP dans les réseaux de capteurs sans fil. Projet de fin d'étude. Université de Ouargla.
- [10] Boukhdimi, M. Meziane, D. (2018). Étude comparative des protocoles de routage hiérarchiques LEACH et SEP dans RCSF. Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en informatique. Université de Ain Timouchent.
- [11] Mémoire de Master en informatique. Simulation d'un réseau de capteur sans fil sous Contiki, La localisation d'un mobile. Université A/Mira de Bejaia.
- [12] <https://www.Rapport-gratuit.com>
- [13] <https://github.com/ARD92/leach-protocol#readme>
- [14] <https://www.fr.wikipedia.org/wiki/Routage>.
- [15] Malik, G. (2014). Etat de l'art sur les techniques de routage dans les WSN. Université Chikh Anta DIOP, Dakar.
- [16] Mbakop, N, G, G. (2014). Réseaux de capteur sans fil. Ecole National Supérieur des postes et Télécommunication, Camroon.
- [17] Yassine, Y. (2012). Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs. Mémoire de Magister. Université de Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
- [18] Benouar, D. (Octobre 2010). Supervision de l'opération d'irrigation

des arbres fruitiers à l'aide des réseaux de capteurs sans fil. Université Saad Dahlab, Blida.

[19] <https://mycomputernotes.com>

[20] Guettaf, D. Hadjal, L. Mémoire fin de cycle de Master en informatique. Amélioration et simulation du protocole de routage AORP dans les réseaux de capteurs sans fil. Université d'Ain Timouchent.

[21] Ferhat, H. Cherdioui, S. Le routage dans les réseaux de capteur sans fil. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.

[22] Meldjem, S. khalfi, C. Merabtine, N. Hadj rabah, K. (2013). Cours technologie réseaux licence GTR 3ème années. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene.

[23] Wendi Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. (2000). Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks, Proc.Hawaiian Int'l Conf. on Systems Science.

[24] Benyagoub, A. (2013). Sécurisation du protocole de routage hiérarchique LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de Master. Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen.

[25] Amira, A. (2018). Les protocoles de routage dans les réseaux de capteur sans fil. Université d'Annaba.

[26] <https://123dok.net/article/protocolesroutagehi->

routagercsf.q2mgpkry

[27] Sahraoui, B. (2015). *La Géolocalisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil* (Doctoral dissertation).

[28] Boubiche, D. E. (2008). Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de Magister, Université de l'Hadj Lakhdar-Batna.

[29] Ouabdsslam, M. (2012). Routage à économie d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.

[30] Benyagoub, A. (2013). Sécurisation du protocole de routage hiérarchique LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de Master. Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen.

[31] BOUKHDIMI-M, MEZIANE-D. Mémoire de Master en informatique. Étude comparative des protocoles de routage hiérarchiques LEACH et SEP dans RCSF. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.

[32] POOJA-G, ANJALI-PRIYANKA. (Juin 2018). Comparative Study of LEACH, SEP, TEEN, DEEC, AND PEGASIS IN WIRELESS SENSOR NETWORK, International Research Journal of Engineering and Technology.

[33] Amrinder K, Sunil S. (2013). Simulation of Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol for Wireless Sensor Network, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering.

- [34] Donglin L, Suyuan W. Improvement of the SEP Protocol based on Community Structure of Node Degree. Xi'an Research Institute of High Technology, China.
- [35] Kashaf, N. Javaid, Z. Khan, I. TSEP: Threshold-sensitive Stable Election Protocol for WSNs.
- [36] Liquan Zhao, Qi Tang. An Improved Threshold-Sensitive Stable Election Routing Energy Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks.
- [37] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks.
- [38] J. Kennedy, R.C. Eberhart. (1997). A discrete binary version of the particle swarm algorithm. Proceedings of the World Multi conference on Systemic, Cybernetics and Informatics.
- [39] Cooren, Y. (2008). Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Thèse de Doctorat, Université de Paris, France.
- [40] Wilson, O. (1975). The new synthesis. Université de Harvard.
- [41] MOHAMMED BELGHACHI, Conception de nouvelles approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, thèse de doctorat, 2016.
- [42] Amira Bendjeddou, les réseaux de capteurs sans fil, cours en ligne, université de Annaba, 2022.

[43] Pooja Giri, Dr. Anjali Potnis , Priyanka Tripathi, Comparative Study Of Leach, Sep, Teen, Deec, And Pegasis In Wireless Sensor Network, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056, Volume: 05 Issue: 06 | June-2018

[44]. Amrinder Kaur, Sunil Saini,” Simulation of Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol for Wireless Sensor Network,” International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Volume 3, Issue7, July 2013.

[45] : A. Kashaf, N. Javaid, Z. A. Khan , I. A. Khan, TSEP: Threshold-sensitive Stable Election Protocol for WSNs,

[46] Chong, C.Y. and S.P. Kumar, 2003. Sensor networks: Evolution, opportunities and challenges. Proc. IEEE, 91: 1247-1256. DOI: 10.1109/JPROC.2003.814918

[47] Z. A. Khan, S. Sampalli “AZR-LEACH: An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks” Int. J. Communications, Network and System Sciences, 5, 785-7952012.