

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Mathématiques et Informatique



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en informatique
Option : Systèmes Intelligents

Thème

**Vers une plate-forme efficace en énergie pour
les réseaux de capteurs sans fil**

Préparé par
Abdallah BANANA

Encadré par
Mr. Kaddi Mohammed

Année Universitaire 2017/2018

Résumé

Depuis ces deux dernières décennies, une nouvelle technologie sans fil appelée Réseau de Capteur Sans Fil (RCSF) résultant d'une fusion entre les systèmes embarqués et les communications sans fil a vu le jour. Un RCSF ("WSN : Wireless Sensor Network" en Anglais) est un réseau Ad hoc composé d'un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs qui peuvent être déployés de façon aléatoire ou déterministe dans une zone d'intérêt donnée. Ces nœuds capteurs sont capables de récolter plusieurs paramètres physiques sur l'environnement qui les entoure, appelé généralement zone de captage (ou zone de surveillance). Ensuite, ils doivent si nécessaire traiter les données capturées et les transmettre à un (ou plusieurs) nœud de collecte appelé station de base, centre de traitement ("sink" en Anglais). Beaucoup de domaines d'applications tels que le contrôle et suivi environnemental, le contrôle de production dans l'industrie, la surveillance de zone, le monitoring de l'habitat, l'agriculture intelligente, etc. sont basés sur les RCSF. Dans ce mémoire, nous suggérons une technique basée sur l'une des méthodes métaheuristiques pour minimiser la consommation d'énergie. Nous simulons cette technique par MATLAB.

Mots Clés : Réseaux de capteurs sans fil, Clustering, Cluster Head, Efficacité énergétique.

Abstract

Over the past two decades, a new wireless technology called Wireless Sensor Network (RCSF) resulting from a merger between on-board systems and wireless communications has emerged. An RCSF ("WSN: Wireless Sensor Network") is an Ad hoc network made up of a large number of nodes which are micro-sensors that can be deployed randomly or deterministically in a given area of interest. These sensor nodes are able to collect several physical parameters from the environment around them, generally called a catchment area (or monitoring area). Then, if necessary, they must process the captured data and transmit them to one (or more) collection node called base station, processing center ("sink" in English). Many application areas such as environmental monitoring and control, industrial production control, area surveillance, habitat monitoring, smart agriculture, etc. are based on RCSF. In this dissertation, we suggest a technique based on one of the metaheuristic methods to minimize energy consumption. We simulate this technique by MATLAB.

Keywords: Wireless sensor networks, Clustering, Cluster Head, Energy efficiency.

Remerciement

Grâce à Dieu vers lequel vont toutes les louanges, de travail s'est accompli.

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur **Mr. KADDI Mohammed** pour m'avoir honoré par son encadrement, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance durant toute la période du travail.*

Je voudrais également remercier les membres du jury pour l'honneur d'avoir voulu examiner et évaluer ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants du département des Mathématiques et Informatique.

Je n'oublie pas ma famille pour leur contribution, leur soutien et leur patience, mes proches et amis qui m'ont soutenu et encouragé.

Merci à vous tous

Dédicace

Je dédie ce travail à

A la mémoire de mon défunt père.

*À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre ,,
À cet source de tendresse, de patience et de générosité,,
À ma mère !*

*À mon grand frère et père Mohamed.
À ma femme qui a toujours était à mes côtés.
A mes chères filles : Fatima Zohra, Hadjer, Allaa.*

*A mon chère fils Imad, Abdelkader, Ayoub.
À mon chère frère Abdeslam.*

*À tous mes sœurs, ainsi que leurs époux et leurs enfants.
À tous mes amis et collègues.
À tous les étudiants de la promotion 2017/2018.
Option : Système Intelligent.*

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer ..

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Résumé | I |
| Remerciement..... | II |
| Dédicace | III |
| Table des matières | IV |
| Table des figures | VII |
| Liste des tableaux | IX |
| Introduction générale..... | 01 |
| Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil | 03 |
| 1.1 Introduction | 04 |
| 1.2 Réseau sans fil..... | 04 |
| 1.2.1 Définition | 04 |
| 1.3 Les capteurs | 08 |
| 1.3.1 Définition de capteur | 08 |
| 1.3.2 Architecture | 09 |
| 1.3.3 Caractéristiques principales d'un capteur | 11 |
| 1.3.4 Vue d'ensemble des plates-formes existantes | 13 |
| 1.4 Réseaux de capteur sans fil | 15 |
| 1.4.1 Définition | 15 |
| 1.4.2 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil..... | 16 |
| 1.4.3 Mécanismes utilisés pour atteindre les caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil. | 18 |
| 1.4.4 Comparaison entre réseaux de capteurs sans fil et réseaux ad hoc | 18 |
| 1.4.5 Architecture de communication | 20 |
| 1.4.6 Contraintes de conception des réseaux de capteurs sans fil | 22 |
| 1.5 Applications des réseaux de capteurs | 25 |
| 1.5.1 Application militaire | 25 |
| 1.5.2 Applications médical | 26 |
| 1.5.3 Applications environnementales | 26 |
| 1.5.4 Applications commerciales | 26 |
| 1.5.5 Applications agricoles | 26 |
| 1.5.6 Applications à la sécurité..... | 26 |
| 1.6 Techniques de conservation énergétique dans les RCSFs | 27 |
| 1.6.1 L'énergie de capture | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 1.6.2 L'énergie de traitement | 28 |
| 1.6.3 L'énergie de communication | 28 |
| 1.7 Classification des techniques de conservation énergétique | 28 |
| 1.7.1 Approches basées sur le cycle d'activité | 29 |
| 1.7.2 Approches dirigées par les données | 30 |
| 1.7.3 Approches basées sur la mobilité | 30 |
| 1.8 Conclusion | 31 |
| Chapitre 2 : Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil | 33 |
| 2.1 Introduction | 34 |
| 2.2 Routage | 34 |
| 2.3 Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil | 34 |
| 2.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs | 35 |
| 2.4.1 Les protocoles de routage plat | 36 |
| 2.4.2 Les protocoles de routage hiérarchique | 36 |
| 2.4.3 Les protocoles de routage avec localisation géographique | 37 |
| 2.4.4 Protocole de routage multi-chemin | 38 |
| 2.4.5 Protocole de routage basé sur la négociation des données | 38 |
| 2.4.6 Protocole de routage basé sur les interrogations | 38 |
| 2.4.7 Protocole de routage basé sur la QoS | 39 |
| 2.5 Exemples des protocoles de routage proposés pour les RCSFs | 39 |
| 2.5.1 Protocoles de routage hiérarchiques | 39 |
| 2.5.2 Protocoles de routage non hiérarchiques | 40 |
| 2.6 Le protocole de routage LEACH et ses variantes | 43 |
| 2.6.1 Algorithme détaillé de LEACH | 44 |
| 2.6.2 Les variantes de LEACH | 49 |
| 2.7 Conclusion | 56 |
| Chapitre 3: Algorithme de chauves-souris et travaux antérieurs | 57 |
| 3.1 Introduction | 58 |
| 3.2 Comportement, Echolocation et Ultrason des chauves-souris | 58 |
| 3.3 Domaine d'applications | 62 |
| 3.4 Travaux antérieurs | 63 |
| 3.5 Conclusion | 66 |
| Chapitre 4 : Contribution | 67 |
| 4.1 Introduction | 68 |
| 4.2 L'architecture de la contribution proposée | 68 |

| | |
|--|----|
| 4.3 Déroulement de notre technique | 69 |
| 4.4 Le modèle de réseau | 75 |
| 4.5 Le modèle d'énergie | 76 |
| 4.6 Implémentation de notre technique | 77 |
| 4.6.1 Le Choix de langage de programmation | 77 |
| 4.6.2 Description de l'interface de simulation | 78 |
| 4.7 Résultats & Analyse | 81 |
| 4.7.1 Résultats | 81 |
| 4.7.2 Analyse des résultats | 83 |
| 4.8 Conclusion | 83 |
| Conclusion générale et perspectives..... | 84 |
| Bibliographie | |

Table des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Classification des réseaux sans fil..... | 05 |
| Figure 1.2 : Le modèle de réseau mobile avec infrastructure | 06 |
| Figure 1.3 : Réseau en mode ad hoc | 06 |
| Figure 1.4 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc | 07 |
| Figure 1.5 : Exemple de Capteur MICAZ | 08 |
| Figure 1.6 : Les trois fonctions principales d'un capteur | 09 |
| Figure 1.7 : Architecture d'un capteur | 09 |
| Figure 1.8 : Rayon de communication et de sensation | 12 |
| Figure 1.9 : Chronologie des plates-formes de capteurs sans fil..... | 13 |
| Figure 1.10 : Exemple de réseau de capture sans fil | 16 |
| Figure 1.11 : Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs..... | 20 |
| Figure 1.12 : Energie consommée par les sous-systèmes d'un capteur | 22 |
| Figure 1.13 : Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil..... | 27 |
| Figure 1.14: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs | 29 |
| Figure 2.1 : Classification des protocoles des protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau et le type de protocole | 35 |
| Figure 2.2 : Topologie de protocole de routage plat | 36 |
| Figure 2.3: Routage hiérarchique | 37 |
| Figure 2.4 : Protocoles de routage avec localisation géographique | 38 |
| Figure 2.5: Illustration de protocole PEGASIS | 40 |
| Figure 2.6 : Mécanisme de détection de route possible par AODV entre A et J | 41 |
| Figure 2.7 : Etapes de fonctionnement du protocole SPIN..... | 42 |
| Figure 2.8 : Architecture de protocole hiérarchique LEACH..... | 44 |
| Figure 2.9: Organigramme de Set-up phase protocole LEACH | 46 |
| Figure 2.10: Organigramme de Steady phase protocole LEACH..... | 47 |
| Figure 3.1 : Echolocation de chauves-souris | 59 |
| Figure 3.2 : Pseudo code de l'algorithme de chauves-souris..... | 61 |
| Figure 3.3 : Domaine d'applications d'algorithme de chauves-souris..... | 62 |
| Figure 4.1 : Organigramme de la phase déploiement de notre technique | 69 |
| Figure 4.2 : Organigramme de phase de communication | 74 |
| Figure 4.3 : Modèle de réseau | 75 |
| Figure 4.4 : Le modèle de dissipation de l'énergie | 77 |
| Figure 4.5 : Interface de notre application | 78 |

Figure 4.6: Zone de simulation 79

Figure 4.7: Légende 79

Figure 4.8: Simulation 80

Figure 4.9: Résultats de simulation..... 80

Figure 4.10: Durée de vie du réseau 82

Figure 4.11: Energie consommée Vs nombre d'itérations. 82

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Caractéristiques de nœuds capteurs existants | 14 |
| Tableau 1.2 : Exemple de Modules de captage Externe de capteurs..... | 15 |
| Tableau 2.1 : Comparaison des protocoles LEACH, PEGASIS, TEEN, SPIN, AODV, DSDV | 43 |
| Tableau 2.2 : Comparaison entre LEACH et ses différentes variantes | 54 |
| Tableau 4.1: Caractéristiques matérielles | 77 |
| Tableau 4.2: Résultats de simulations | 81 |

Introduction générale

Le besoin effréné d'informations et l'évolution rapide de la micro-électronique et des technologies sans fil ont abouti à une progression massive de la technologie sans fil. Par ailleurs, l'architecture ad-hoc représente l'une des implémentations les plus utilisées dans le monde de la technologie sans fil. Sa caractéristique d'auto-organisation et l'évolutivité de la topologie lui permettent de développer plusieurs infrastructures telles que les réseaux mobiles, les réseaux de capteurs et dernièrement l'internet des objets (en anglais Internet of Things, ou IoT).

La microélectronique, la communication sans fil, mais aussi la miniaturisation ont été les principaux acteurs donnant naissance au réseau de capteurs sans fil. Le développement des réseaux de capteurs sans fil était originalement motivé par les applications militaires (*surveillance des champs de bataille, localisation de l'ennemi...*). Néanmoins, leurs performances remarquables en termes de fiabilité et de faible coût ont permis de proliférer leur utilisation dans le domaine d'application civil (*surveillance d'environnement, l'industrie, la domotique, la santé...*). Cependant, de nouveaux problèmes apparaissent qui rendent les réseaux sans fil moins fiables que les réseaux filaires. Ainsi de nouvelles techniques doivent être mise en place pour pallier à ce genre de situation.

L'économie d'énergie représente l'un des grands défis à soulever pour le bon fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil. En effet, les nœuds capteurs sont généralement alimentés au moyen d'une petite batterie limitée en puissance, et le remplacement de celle-ci est une tâche très difficile voire impossible. Par conséquent, l'épuisement des réserves d'énergie des nœuds capteurs implique la mise hors service du réseau tout entier. La sécurité représente un autre défi très important pour les réseaux de capteurs sans fil, étant donné que des décisions stratégiques peuvent être prises en se basant sur les informations reçues par les nœuds capteurs.

L'objectif de ce projet est de traiter le problème du routage dans les réseaux de capteurs sans fil, et en particulier le routage hiérarchique qui basé sur le principe de cluster. Les nœuds se regroupent dans des clusters, pour chaque cluster on a un chef de cluster qui est chargé de collecter les informations à partir de nœuds membre et les envoyer à une station principale. Le choix de cluster et la formation de cluster est un problème

Introduction générale

d'optimisation surtout sur les réseaux à taille importante. Afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé dans ce mémoire un algorithme d'optimisation basé sur les méta-heuristiques ; l'algorithme de chauves-souris (Bat Algorithme). Une fonction objective a été utilisée pour atteindre une solution optimale.

Pour relater les travaux réalisés dans le cadre de notre projet, notre mémoire s'articule autour des quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil pour illustrer leurs caractéristiques, leurs spécificités, leurs contraintes et leurs domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil et les différents types des protocoles de routage, nous nous intéressons en particulier au protocole LEACH ainsi que ses différentes variantes.

Nous présentons dans le troisième chapitre, l'algorithme de chauves-souris et quelques travaux antérieurs.

Le chapitre quatre présente notre contribution proposée, la description de son déroulement et son implémentation. Par la suite pour voir la performance de technique proposée qui est basé sur l'algorithme de chauves-souris et protocole LEACH-C nous comparons les résultats de la simulation avec le protocole *LEACH-C*.

Enfin, notre mémoire se termine avec une conclusion générale et des perspectives que nous voulons réaliser prochainement.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

1.1 Introduction

1.2 Les réseaux sans Fil

1.3 Les capteurs

1.4 Réseaux de capteurs sans fil

1.5 Applications des réseaux de capteurs

1.6 Techniques de conservation énergétique dans les RCSF

1.7 Classification des techniques de conservation énergétique

1.8 Conclusion

1.1 Introduction :

L'évolution récente des technologies de communication sans fil et l'émergence de terminaux mobiles (portables, smartphones, etc.) ont rendu possible l'accès au réseau partout et à tout moment, sans avoir besoin de brancher les appareils communicants à une infrastructure. En effet, grâce à leur support de transmission qui est le média hertzien, les réseaux sans fil présentent plusieurs avantages qui sont entre autres le coût réduit des équipements, la facilité d'installation et l'ubiquité de l'information. Au cours de leurs évolutions, les réseaux sans fil ont donné naissance à diverses architectures telles que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil, les réseaux ad hoc, etc [1].

Durant ces deux dernières décennies, une nouvelle architecture des réseaux Ad hoc appelée Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs ou WSNs : Wireless Sensor Networks en anglais) a vu le jour. Afin d'offrir des solutions économiquement intéressantes pour la surveillance à distance et le traitement des données dans des environnements complexes. En effet, ce réseau sont constitués d'un ensemble de petits appareils, ou capteurs intelligents, possédant des ressources particulièrement limitées, mais qui leur permettent néanmoins d'acquérir des données sur leur environnement immédiat, de les traiter et de les communiquer.

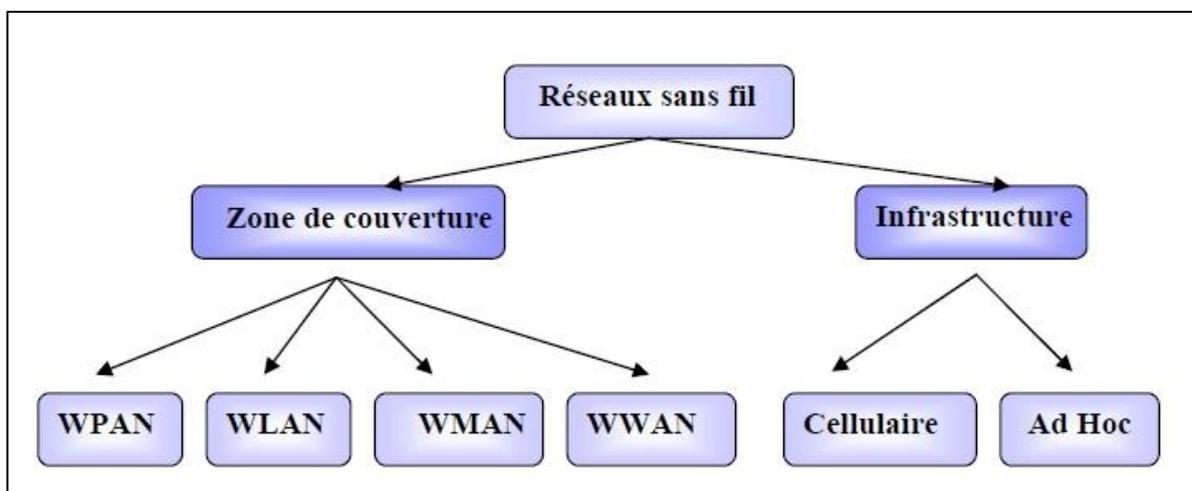
Dans ce chapitre, nous présentons brièvement les réseaux sans fil et réseau Ad hoc, ensuite nous allons détailler un état de l'art sur les RCSFs, qui est l'objet de notre étude. En décrivant leur fonctionnement, leurs architectures, leurs différents domaines d'application. Les modèles de communication utilisés, les contraintes de conception des RCSF et les techniques de conservation d'énergie sont également étudiés.

1.2 Réseau sans fil

1.2.1 Définition

Un réseau sans fil (Wireless network) est un réseau où au moins deux nœuds peuvent avoir une communication sans liaison filaire. Ces réseaux de communications permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services traditionnels des réseaux indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux sans fil peuvent avoir une classification selon deux critères. Le premier est la zone de couverture du réseau.

Au vu de ce critère il existe quatre catégories : les réseaux personnels(WPAN), les réseaux locaux(WLAN), le réseau métropolitain(WMAN) et les réseaux étendus(WWAN). Le second critère est l'infrastructure on peut diviser les réseaux sans fils en : réseaux avec infrastructures(cellulaire) et réseaux sans infrastructure(Ad hoc)



[2], comme on le voit dans l'illustration de la figure suivante :

Figure1.1 : Classification des réseaux sans fil [2].

a. Réseaux cellulaires (avec infrastructure)

Dans les réseaux avec infrastructure, il existe une entité centrale, appelée coordinateur ou station de base (SB) qui a pour rôle d'orchestrer toute l'activité du réseau.

Comme illustré dans la figure 1.2, les réseaux avec infrastructure sont partitionnés en cellules, encore appelées zones. Chaque zone dispose d'un coordinateur appelé station de base qui joue le rôle de l'entité centrale. Toutes les communications passent par la station de base. La particularité de cette famille de réseau est que toutes les communications passent obligatoirement par la station de base. Le système de communication est fondé essentiellement sur l'utilisation de réseaux filaires mais aussi de station de base, avec une longue portée, pour couvrir l'ensemble des nœuds mobiles. Ainsi, les réseaux avec infrastructure nécessitent une importante logistique pour leur déploiement [3].

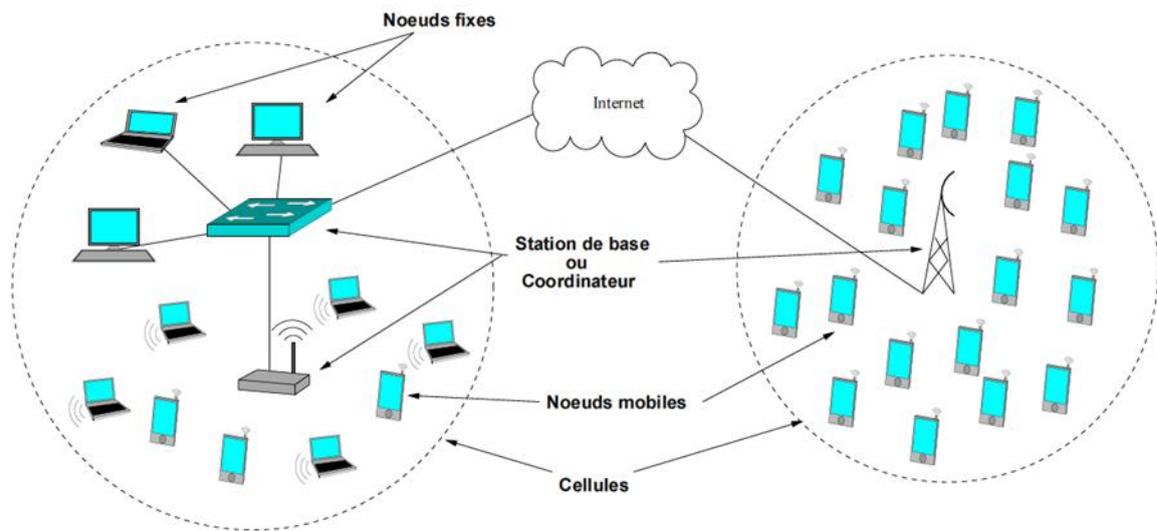


Figure 1.2 : Le modèle de réseau mobile avec infrastructure [3].

b. Réseaux ad hoc (sans infrastructure)

Un réseau mobile ad hoc, appelé généralement Mobile Ad hoc Network (MANET), est un ensemble de nœuds mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque d'une manière autonome et coopérative, sans l'utilisation d'une infrastructure préexistante ou d'une administration centralisée. Les "ondes radio" qui se propagent entre les différents nœuds mobiles sont le seul moyen de communication. Dès qu'un ensemble de nœuds mobiles se trouve à portée radio les uns des autres, alors le réseau se forme spontanément mais de manière provisoire. Il existe deux modes de communication entre deux nœuds mobiles qui dépendent de la distance qui les sépare. Dans le cas où les deux nœuds sont à portée radio et peuvent communiquer directement, ce mode est appelé transmission Ad hoc. En revanche, dans le cas où les deux nœuds ne sont pas à portée, ils doivent utiliser d'autres nœuds mobiles comme relais afin d'assurer la communication et d'acheminer les paquets à destination, ce mode est appelé transmission multi-sauts [1].

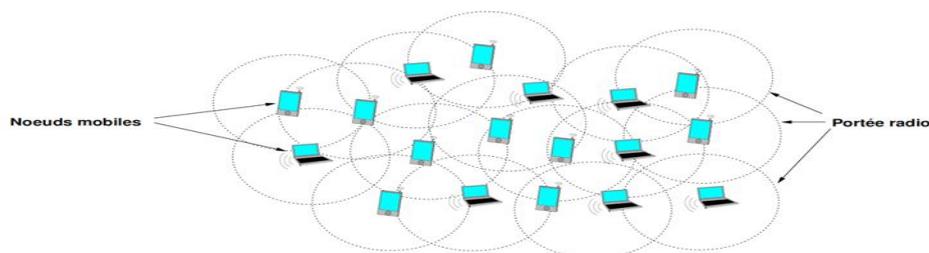
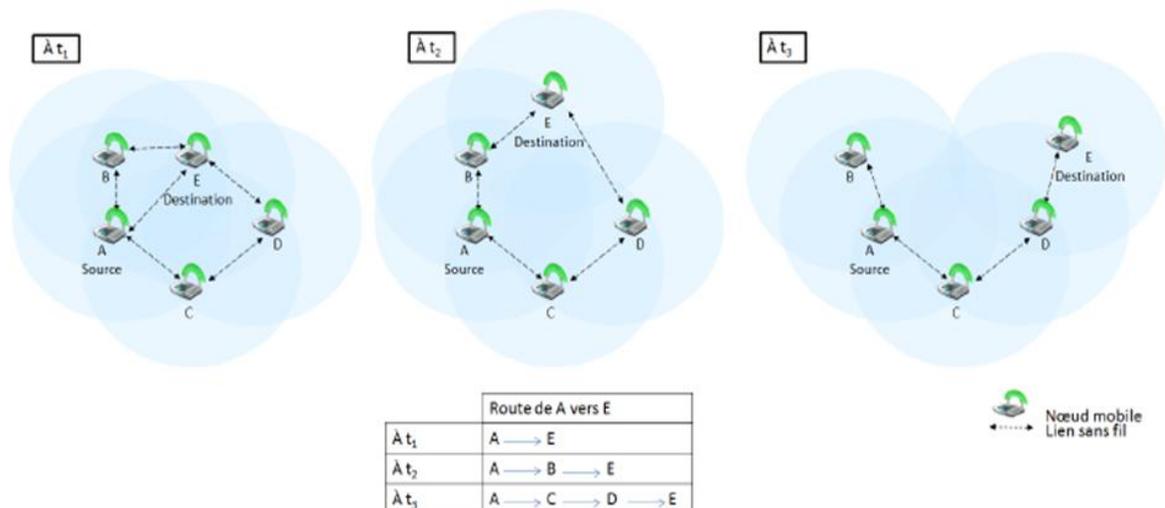


Figure1.3 : Réseau en mode ad hoc [3].

Un réseau ad hoc est un réseau sans fil auto-configurable. Lorsque deux machines mobiles ou plus se retrouvent dans le même secteur géographique, elles doivent se reconnaître pour pouvoir s'échanger des données. Le réseau doit se configurer automatiquement ; périodiquement ou à la demande pour assurer la liaison entre ces machines.

Un réseau ad hoc doit être facilement déployé, les nœuds peuvent joindre et quitter le réseau de façon totalement dynamique sans devoir en informer le réseau et si possible sans perturber les communications entre les autres nœuds du réseau. La topologie des réseaux ad hoc est dynamique et décentralisée. Elle peut changer aléatoirement, et les unités mobiles sont libres de se déplacer arbitrairement. De ce fait, la déconnexion de ces



unités est très fréquente.

Figure 1.4 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc [1].

Les réseaux mobiles ad hoc sont caractérisés par ce qui suit :

- ❖ Une topologie dynamique : Les unités mobiles du réseau, se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Par conséquent la topologie du réseau peut changer, à des instants imprévisibles, d'une manière rapide et aléatoire.
- ❖ Une bande passante limitée : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.

- ❖ Des contraintes d'énergie : Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.
- ❖ Une sécurité physique limitée : Les réseaux mobiles ad hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- ❖ L'absence d'infrastructure : Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

1.3 Les capteurs

1.3.1 Définition de capteur

Un capteur est un dispositif destiné à mesurer une donnée environnementale comme la température, ou même capturer une image par exemple, et de la transformer en information utilisable puis de la transmettre à une unité de traitement de façon analogique ou numérique. Ces capteurs doivent donc être connectés à un appareil capable d'en interpréter la mesure, puis, selon l'usage souhaité permettre l'utilisation [4].

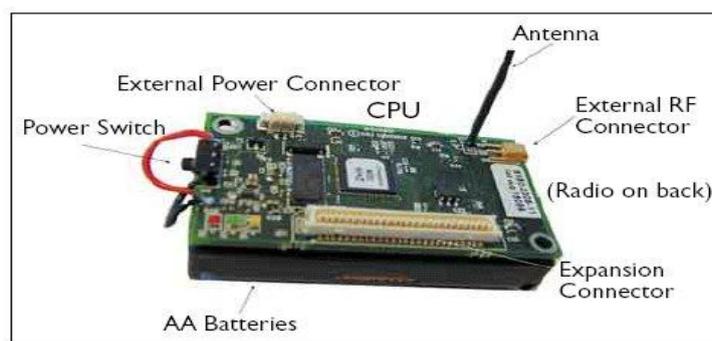


Figure 1.5 : Exemple de Capteur MICAZ [8].

Chaque capteur assure trois fonctions principales : la collecte, le traitement et la communication de l'information vers un ou plusieurs points de collecte appelés station de base(puit).

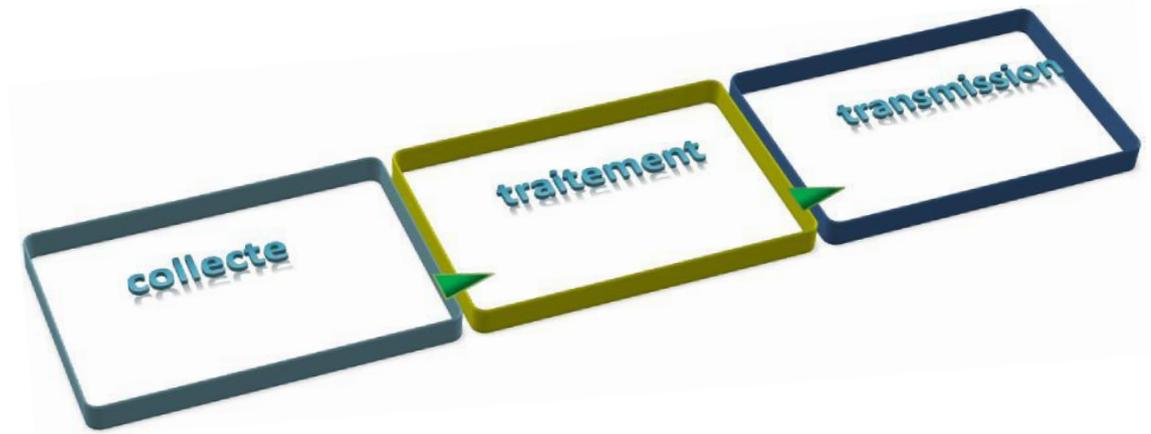


Figure 1.6 : Les trois fonctions principales d'un capteur.

1.3.2 Architecture

Suivant le type d'application : il existe plusieurs types de capteurs : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé principalement d'une unité de : capture, traitement, communication et énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application, comme par exemple un système de localisation de l'environnement tel qu'un GPS (Global Positioning System), d'un système de mobilité mais aussi parfois d'un générateur d'énergie (exemple : cellule solaire) [4].

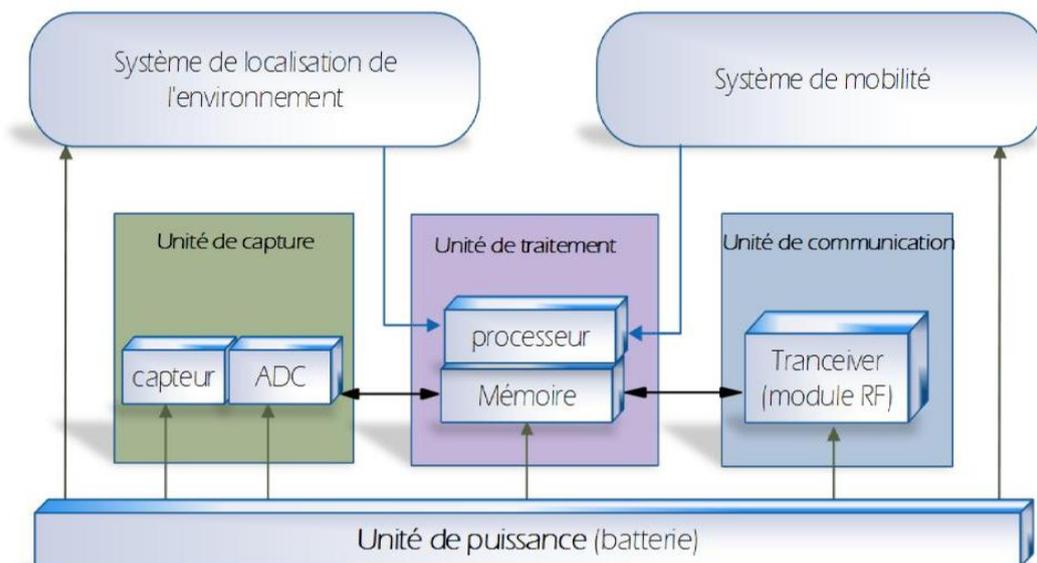


Figure 1.7 : Architecture d'un capteur [4].

- ❖ **Unité de capture** ("Sensing unit") : est composée de deux sous-unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC ("Analog to Digital Converter"). Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques. Et l'ADC transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- ❖ **Unité de traitement** ("**Processing unit**") : c'est l'unité principale du capteur, généralement un processeur couplé à une mémoire vive. Son rôle est de contrôler le bon fonctionnement des autres unités. Sur certains capteurs elle peut embarquer un système d'exploitation pour faire fonctionner le capteur. Elle peut aussi être couplée à une unité de stockage, qui servira par exemple à y enregistrer les informations transmises par l'unité de capture.
- ❖ **Unité de communication** ("Transceiver unit") : elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un médium « sans-fil ». Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radiofréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, ne pouvant pas établir de liaisons à travers des obstacles, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Les unités de transmission de type radiofréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ceci implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur.
- ❖ **Unité d'énergie** ("Power unit") : un nœud capteur est muni d'une ressource énergétique (une batterie). Étant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est limitée. Ceci fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse d'un capteur, car elle influe directement sur sa durée de vie.
- ❖ **Système de localisation de l'environnement** : les tâches de détection et les techniques de routage ont besoin de connaître souvent la localisation géographique d'un nœud. Ainsi, un nœud peut être équipé d'un système de localisation géographique. Ce système peut se composer d'un module de GPS pour un nœud de haut niveau ou bien d'un module de software qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent les informations sur l'emplacement du nœud par des calculs distribués.
- ❖ **Système de mobilité** : la mobilité est parfois nécessaire pour permettre à un nœud de

se déplacer pour accomplir ses tâches. Le support de mobilité exige des ressources énergétiques étendues qui devraient être fournies efficacement. Le système de mobilité peut, également, opérer dans l'interaction étroite avec l'unité de détection et le processeur pour contrôler les mouvements du nœud.

1.3.3 Caractéristiques principales d'un capteur

Les capteurs permettent de recueillir et de transmettre des données du monde physique sur lequel ils sont déployés. Les paramètres de ces données peuvent être la pression, la viscosité, la Vibration, la température, la vitesse, la position des objets surveillés...

Les nœuds s'appuient sur certaines caractéristiques pour transmettre tel que :

❖ **L'énergie** : l'énergie est considérée comme la principale et fondamentale contrainte dans les réseaux de capteurs sans fil. Chaque nœud fonctionne grâce à une batterie ayant une capacité limitée dû à sa petite taille mais également non rechargeable. L'utilisation de ces capteurs se fera, dans la plupart des cas, dans des environnements hostiles ou difficiles d'accès, ce qui ne permettra pas la récupération de celles-ci. Nous pouvons donc dire que toute utilisation de la technologie du réseau de capteur sans fil [35].

❖ **La puissance de stockage et de traitement** : la puissance de stockage ainsi que la puissance de traitement des données pour un capteur restent relativement faible. Par exemple, les nœuds capteurs de type « Tmote Sky » [5] sont composés d'un microcontrôleur cadencé à 8MHz, 48Ko de mémoire et d'une radio de débit environ 250 kbps avec une fréquence pouvant aller à 2,4 Ghz. Cela reste vrai même pour les nœuds de moyenne gamme, comme les « UCLA/ROCKWELL'S WINS », qui ont un processeur StrongARM 1100 avec une mémoire flash de 1Mo, une mémoire RAM de 128Ko et une radio dont le débit est 100Kbps [6].

❖ **La portée de transmission** : La portée de transmission est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées et la puissance du signal mises en jeu. Par exemple, la communication entre deux nœuds capteurs ne peut avoir lieu que si la distance qui les sépare n'est pas trop importante (quelques dizaines de mètres en pratique). Et que plus cette distance est grande, plus le coût énergétique est élevé. C'est d'autant plus vrai s'il y a des obstacles physiques entre les deux nœuds qui risquent d'empêcher toute communication.

Un capteur possède deux zones : une zone de perception (rayon de sensation R_S) et une zone de communication (rayon de communication R_C). Pour schématiser, on considère que ces zones sont représentées par deux cercles qui ont pour centre le capteur.

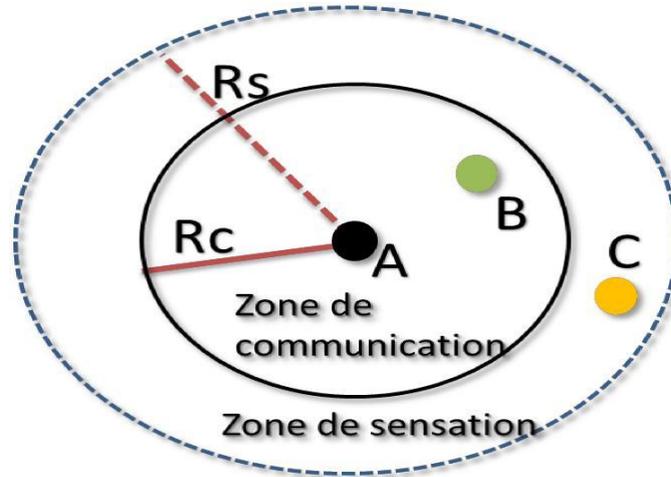


Figure 1.8 : Rayon de communication et de sensation [4].

La Figure 1.8 montre les zones définies par ces deux rayons pour le capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs (le capteur B). D'autre part, la zone de sensation est la zone où le capteur A peut capter l'événement. En effet, pour qu'un capteur ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. Comme les capteurs sont généralement disposés sur la zone à couvrir de façon aléatoire, il est nécessaire de disposer d'une densité importante de capteurs. Mais si la densité de capteurs est trop importante et que la zone que l'on veut surveiller est "trop" couverte, alors des capteurs vont fonctionner inutilement [4].

1.3.4 Vue d'ensemble des plates-formes existantes

Comme un certain nombre de technologies connues à ce jour, les nœuds de capteurs



Figure 1.9 : Chronologie des plates-formes de capteurs sans fil.

sans fil doivent être nés d'un projet militaire, ce qui entrave la mise en place d'une chronographie précise de leur développement. Cependant, le titre de premier prototype de nœuds de capteurs sans fil identifiable dans la bibliographie correspond au module LWIM (Low-power Wireless Integrated Microsensors) développé dans le milieu des années 90 par l'Agence pour les Projets de Recherche Avancée de Défense (DARPA) des États-Unis et l'UCLA (Université de Californie à Los Angeles). Il s'agissait d'un géophone équipé d'un capteur de transmission radiofréquence et d'un contrôleur PIC [10].

Il existe actuellement un grand nombre de capteurs, avec des fonctionnalités diverses et variées. Tous ces différents capteurs ne pourraient être décrits ici, cependant une liste exhaustive peut être trouvée sur le site The Sensor Network Museum [8].

Par exemple Xbow (Crossbow) référence dans la fabrication de capteurs est née au sein de la célèbre université californienne. Les capteurs fabriqués par Xbow au cours des dix dernières années (famille de capteurs Mica et Telos) sont sans aucun doute les plus utilisés dans les expériences et travaux de recherche. Ces capteurs sont capables de mesurer plusieurs métriques (température, humidité, luminosité, etc...). Le tableau suivant décrit les caractéristiques physiques de quelques exemples de capteurs existant sur le marché.

Tableau 1.1 : Caractéristiques de nœuds capteurs existants [10].

| | Btnode2  | Mica2  | Mica2dot  | Micaz  | Telos A  | Tmote Sky  | Eyes  |
|---------------------|--|--|---|--|---|--|---|
| Fabricant | Art of technology | Crossbow | | | Imote iv | | Univ-Twente |
| Micro-contrôleur | Atmel ATmega128L | | | | Texas instruments Ms-P430 | | |
| Fréquence d'horloge | 7.37 Mhz | | 4 Mhz | 7.37 Mhz | 8 Mhz | | 5 Mhz |
| RAM(kb) | 64 +180 | 4 | 4 | 4 | 2 | 10 | 2 |
| ROM(kb) | 128 | 128 | 128 | 128 | 60 | 48 | 60 |
| Stockage | 4 | 512 | 512 | 512 | 256 | 1024 | 4 |
| Radio | CC1000 (radio transcepteur multi-freq. 868/916 - 433 - 315 MHz, 38.4Kbaud) | | | Chipcon CC2420 (radio transcepteur 802.15.4, bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps) | | | TR1001 (RFM, bande passante 125Ko, bands ISM 868.35 ou 315 MHz) |
| Couverture (m) | 150-300 | | | 75-100 | | | |
| Energie | 2 AA batteries | | Coin Cell | 2 AA batteries | | | |
| Connecteur PC | à travers de la carte de programmation connectée au pc | | | | USB | | Porte série |
| OS | Nut/OS | TinyOS | | | | | PEEROS |
| Autres | + Bluetooth radio | | | | | | |

Le concept prévaut dans le développement de nœuds de capteurs est la conception modulaire. En effet, tous les nœuds de la table 1.1 sont en fait des cartes intégrées qui regroupent l'unité de communication et l'unité de traitement, tandis que l'unité de captage est conçue comme une carte distincte qui peut être attachée sur l'unité principale. Cela permet de réutiliser les mêmes unités pour différentes applications. Par exemple, un nœud

Mica2 peut être combiné avec une carte MTS310 qui comprend un capteur de température, un capteur lumière, un capteur de son, un capteur de champ magnétique, et un accéléromètre à deux axes. De même, nous pouvons combiner le nœud Mica2 avec une carte MTS420 pour le doter d'un capteur d'humidité et d'un capteur de pression barométrique, et même d'un GPS pour le positionnement géographique [10].

Tableau 1.2 : Exemple de Modules de captage Externe de capteurs [11].

| Module | Capteur compatible | Fonctions |
|----------------------------------|-----------------------------|--|
| MTS101CA | MICAz, MICA2, MICA | Lumière, température |
| MTS300CA MTS300CB | IRIS, MICAz, MICA2, MICA | Lumière, température, microphone et buzzer |
| MTS310CA MTS310CB | IRIS, MICAz, MICA2, MICA | Lumière, température, microphone, buzzer, accéléromètre 2 axes et magnétomètre 2 axes |
| MTS400CA MTS400CB MTS400CC | IRIS, MICAz, MICA2 | Lumière ambiante, humidité relative, température, accéléromètre 2 axes et pression barométrique |
| MTS420CA MTS420CB | IRIS, MICAz, MICA2 | Même que MTS400CA plus GPS module |
| MTS510CA | MICA2DOT | Lumière, microphone et accéléromètre 2 axes |
| MDA100CA MDA100CB | IRIS, MICAz, MICA2 | Lumière, température |
| MDA300CA | IRIS, MICAz, MICA2 | Lumière, humidité relative, interface générale pour capteurs externes |

1.4 Réseaux de capteur sans fil

1.4.1 Définition

Un réseau sans fil de capteurs est une collection de nœuds. Chaque nœud se compose d'une unité de traitement (un ou plusieurs microcontrôleurs, CPU), peut contenir

plusieurs types de mémoire (RAM, disque durs et mémoires Flash), doté d'un émetteur/récepteur et une source d'énergie (par exemple, des batteries et des piles solaires). Les nœuds de ces réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome, dispersés aléatoirement à travers une zone géographique (champ de captage) et mettant en œuvre un routage multi saut jusqu'au nœud considéré comme un « point de collecte » appelé puits (sink). Les RCSFs se composent de nœuds de capteurs qui doivent coopérer à l'exécution d'une fonction spécifique. En particulier, avec la capacité des nœuds de sentir, traiter et communiquer les données, elles sont bien convenues pour exécuter la détection d'événement, qui est clairement une application en avant des réseaux sans fil de capteurs [12].

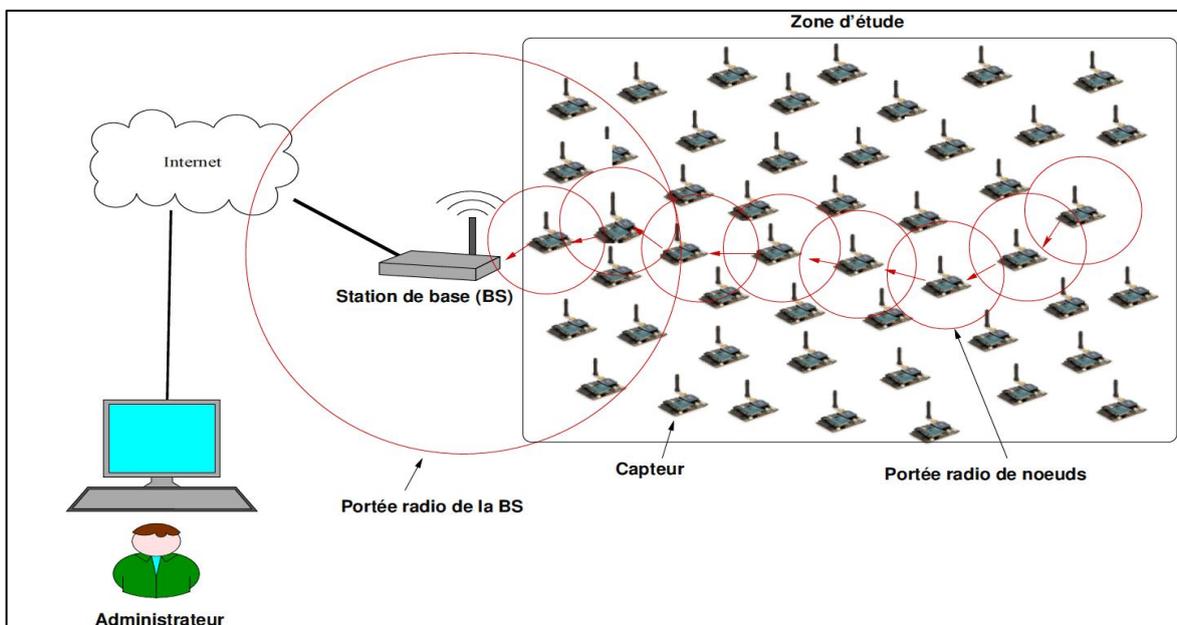


Figure 1.10 : Exemple de réseau de capture sans fil [3].

1.4.2 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil :

Un ensemble de caractéristiques sont importantes pour l'accomplissement des tâches assignées aux applications. Les plus importants sont [1] :

- ❖ **Absence d'infrastructure** : les réseaux ad hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée.
- ❖ **Taille importante** : un réseau de capteurs peut contenir un grand nombre de nœuds

(d'une dizaine de nœuds à des milliers de nœuds).

- ❖ **La Qualité de service (QoS) :** C'est une métrique de la qualité de service qui va être offerte par un RCSFs à ses utilisateurs/applications. Le niveau de QoS est défini par un ensemble d'attributs comme le temps d'attente, la largeur de bande, et la perte de paquets qu'on relie directement avec le type de service du réseau. Dans QoS pour les RCSFs, la quantité et la qualité d'information extraites à partir des puits deviennent appropriées.
- ❖ **Tolérance aux fautes :** il est important que le RCSFs soit capable de traiter l'échec des nœuds capteurs. Une manière reconnue de satisfaire cette contrainte est de réaliser un déploiement redondant des nœuds capteurs.
- ❖ **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul :** la contrainte la plus critique dans les RCSFs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation de la consommation d'énergie est exigée chez chaque nœud. En outre, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont limitées dans un capteur.
- ❖ **Portée de transmission :** la portée de transmission des nœuds capteurs dépend de cinq facteurs : la puissance d'émission, la fréquence, la modulation, la localisation et les conditions météorologiques [13]. Cette portée peut aller de quelques mètres à une centaine de mètres. Par exemple, la portée de transmission de TelosB est de 75m à 100m en outdoor et de 20m à 30m en indoor [14].
- ❖ **Scalabilité :** cette caractéristique traduit la capacité de maintenir la performance indépendamment de la taille du réseau. Comme un grand nombre de nœuds de capteurs peuvent être employés dans les applications de RCSFs, les architectures et les protocoles doivent fournir le support approprié pour maintenir efficacement les services fournis par le réseau.
- ❖ **Maintenance :** les changements dans l'environnement du réseau, par exemple, l'apparition de nœuds de capteurs avec des batteries épuisées, exigent une solution permettant l'adaptation et le maintien des services du RCSFs.
- ❖ **Programmation flexible :** C'est la capacité des nœuds de capteur à modifier les options de traitement des données acquises et à effectuer des changements et des

ajustements de leurs tâches.

1.4.3 Mécanismes utilisés pour atteindre les caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Afin de réaliser les caractéristiques précédentes, des nouveaux mécanismes de communications, d'architectures et de protocoles doivent être développés. Les mécanismes typiques considérés dans les RCSFs sont [1] :

- ❖ **Communication multi-sauts** : Pour les communications à longue distance, l'utilisation des nœuds intermédiaires pour transmettre les paquets, peut induire une réduction de l'énergie exigée.
- ❖ **Utilisation efficace d'énergie** : C'est là un mécanisme clé pour offrir et soutenir sur une durée longue l'opérationnalité du réseau.
- ❖ **Auto-configuration** : Ce mécanisme est employé dans différents aspects des RCSFs. Le nœud capteur devrait être capable d'adapter ses paramètres de service pour tenir compte des défaillances des autres nœuds, des obstacles et de l'ajout de nœuds au réseau.
- ❖ **Collaboration et traitement dans le réseau** : Selon l'application, il est parfois exigé qu'un groupe de nœuds de capteurs interagissent afin de détecter un événement ou faire un traitement plus complet d'informations. La considération des approches des offres de traitement dans le réseau comme l'agrégation de données, qui réduisent la quantité de données transmises et par conséquent améliore l'efficacité énergétique du réseau.
- ❖ **Data-centric** : dans des applications communes, les nœuds de capteurs sont déployés d'une manière redondante, pour protéger le réseau contre des défaillances de nœuds. Dans une approche « data-centric », l'identité d'un nœud particulier fournissant des données devient non pertinente. Le plus important, ce sont les réponses générales que le RCSFs offre à l'utilisateur.

1.4.4 Comparaison entre réseaux de capteurs sans fil et réseaux ad hoc

Les caractéristiques des réseaux de capteurs leurs assurent une large gamme d'applications. La réalisation de ces dernières nécessite des techniques de réseau ad hoc sans

fil. Bien que de nombreux protocoles et algorithmes ont été proposés pour les réseaux classiques ad hoc sans fil, ces derniers ne sont pas bien adaptés pour les caractéristiques et les exigences d'application des RCSFs. Pour clarifier ce point, nous illustrons ci-dessous les principales différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc [15] :

- ❖ Les nœuds d'un réseau ad hoc classique sont souvent utilisés directement par des personnes (par exemple les portables, les PDA, etc.). Dans les RCSFs, les nœuds capteurs interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement et/ou entre eux.
- ❖ Les nœuds capteurs sont déployés avec une grande densité, et leur nombre peut être plus élevé que le nombre de nœuds dans un réseau ad hoc.
- ❖ Le fait que les nœuds capteurs dans un RCSFs sont souvent déployés dans des environnements hostiles (par exemple forêt, volcan, terrain accidenté, etc.), les rend vulnérables et risquent de tomber en panne beaucoup plus souvent que les nœuds dans un réseau ad hoc classique.
- ❖ La topologie d'un réseau de capteurs change très fréquemment du fait des pannes des nœuds ou de leur mobilité.
- ❖ Le flot de données dans les réseaux de capteurs est "Many-to-one" dans la plupart des cas, les données sont collectées par plusieurs nœuds capteurs et envoyées à une seule station de base ou à une passerelle. Dans les réseaux ad hoc le flot de données est "Any-to-any".
- ❖ Les nœuds capteurs sont limités en puissance, capacités de calcul et de mémoire.
- ❖ Les nœuds capteurs peuvent ne pas avoir d'identification globale (ID) en raison de leur nombre élevé. Mais dans les réseaux ad hoc il y'a toujours la notion d'ID.
- ❖ Dans un réseau de capteurs, les nœuds collaborent pour remplir un objectif, par contre dans les réseaux ad hoc chaque nœud a son propre objectif.
- ❖ Dans les réseaux de capteurs l'énergie est un facteur déterminant, et dans les réseaux ad hoc le débit est majeur.

1.4.5 Architecture de communication

Comme tous les types de réseaux, les RCSFs utilisent une architecture de communication en couches, ce sont les cinq premières couches du modèle OSI ; la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application. Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif. Nonobstant le fait que l'objectif d'un RCSFs n'est pas la communication elle-même, qu'il est soumis à de fortes contraintes énergétiques, par voie de conséquence, d'autres unités doivent lui être ajoutées afin de gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches [4].

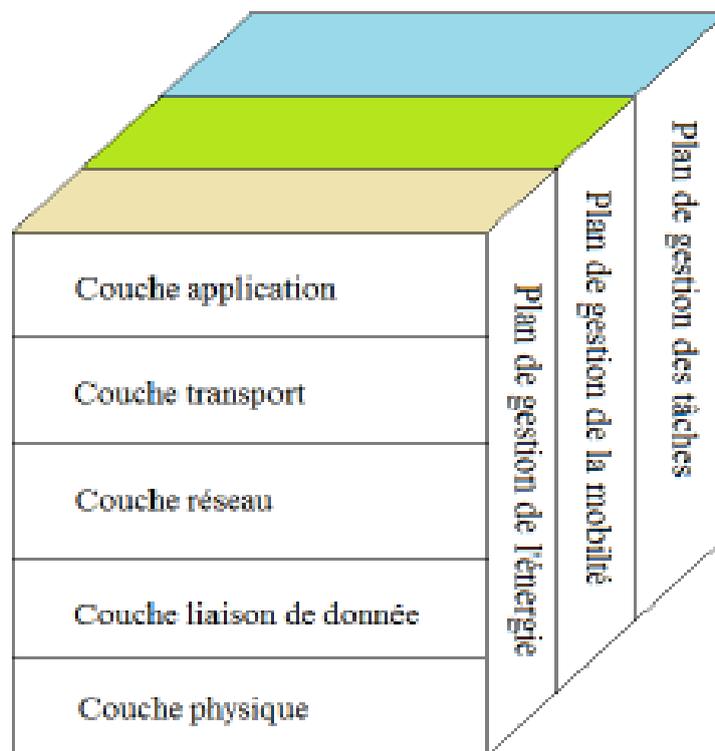


Figure 1.11 : Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs [7].

❖ **Couche physique** : la couche physique est responsable du choix de la fréquence, de la génération de la fréquence porteuse, de la détection du signal, de la modulation et du chiffrement des données. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, les nœuds communicants sont liés par un médium sans fil. Ces liens peuvent être constitués par les ondes radio ou des signaux infrarouges.

❖ **Couche liaison de données** : beaucoup de recherches dans le domaine des réseaux de capteurs entrent dans le cadre de l'optimisation de la couche de liaison. Elle manipule

toutes les issues de communication entre les nœuds voisins. Dans les réseaux sans fil, l'accès au médium commun (la fréquence) doit être contrôlé. Ceci est appelé le contrôle d'accès au Médium (MAC : Medium Access Control). La tâche principale de cette couche est d'interdire l'accès simultané au canal dans la même marge de fréquence radio. Si un récepteur reçoit deux signaux simultanément, c'est malheureusement une collision qui détruit toute l'information reçue par le récepteur. La plupart des protocoles MAC de la couche liaison tentent d'éliminer entièrement les collisions ou de réduire au minimum la capacité de canal qu'ils exigent.

❖ **Couche réseau** : la couche réseau en ce qui concerne les réseaux de capteurs est habituellement conçue selon les principes suivants :

- L'efficacité d'énergie est toujours une considération importante.
- Les réseaux de capteurs sont la plupart du temps data-centric.
- L'agrégation de données est une fonctionnalité majeure.

❖ **La couche transport** : la couche transport fournit un service de communication de bout en bout, fiable pour l'application. 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.

❖ **La couche application** : selon les tâches de capture, il existe différents types de logiciels qui peuvent être installés et employés pour la couche application.

❖ **Gestion d'énergie** : la couche de gestion d'énergie contrôle la manière d'utiliser l'énergie par le nœud capteur, et gère la consommation d'énergie selon le mode de fonctionnement employé (capture, calcul, et communication par radio). Par exemple pour éviter de recevoir des messages redondants, le nœud capteur change son mode en « Off » après une réception d'un message d'un de ses voisins. En outre un nœud capteur annonce à ses voisins qu'il a atteint un bas niveau d'énergie, par conséquent il ne va pas participer au routage des données, et l'énergie restante va être utilisée pour capter et détecter des tâches.

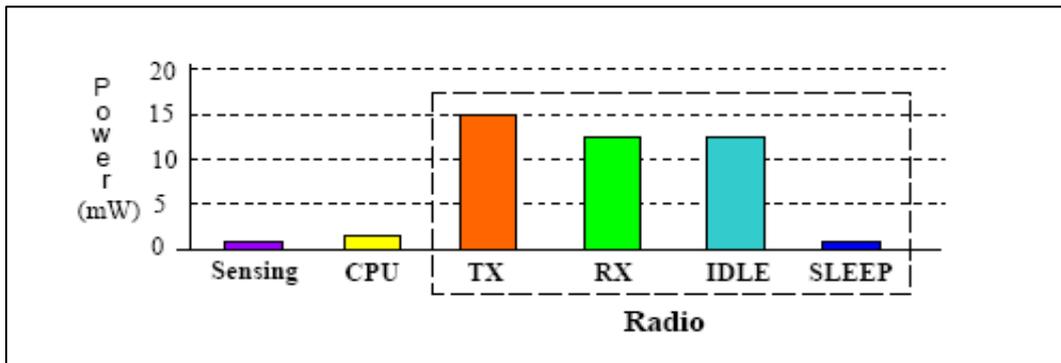


Figure 1.12 : Energie consommée par les sous-systèmes d'un capteur [4].

❖ **Gestion de mobilité** : la couche de gestion de mobilité détecte et enregistre le mouvement/mobilité des nœuds capteurs. En utilisant ces positions, les nœuds capteurs peuvent connaître qui sont leurs voisins. Parfois une auto-organisation des nœuds est nécessaire à cause de la destruction de quelques nœuds. Dans ce cas, la couche de gestion de mobilité doit être capable de faire changer la position des nœuds.

❖ **La gestion des tâches** : la couche de gestion des tâches assure la coopération des efforts des nœuds capteurs, elle ordonnance les événements captés, et les tâches détectées dans une zone de capture spécifique. Par conséquent, les nœuds capteurs qui appartiennent à la même zone de capture ne sont pas obligés d'effectuer les tâches de capture en même temps. Selon leur niveau d'énergie, quelques nœuds capteurs peuvent accomplir des tâches de capture mieux que d'autres.

1.4.6 Contraintes de conception des réseaux de capteurs sans fil

Un ensemble de métriques permet de déterminer le design d'un réseau de capteurs. Ces facteurs influencent sur l'architecture des réseaux de capteurs et le choix des protocoles à implémenter [16] :

❖ **Consommation d'énergie** : l'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner. En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si la perte de nœuds est très importante car ceci engendre des pertes de communications dues à une très grande distance entre les nœuds restants. Les réseaux de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par saut, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la

transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau.

❖ **Routage** : en réseaux ad hoc, protocoles de routage sont censés appliquer trois fonctions principales : la détermination et la détection des changements de la topologie du réseau ; le maintien de la connectivité réseau ; et le calcul et la détection des bon itinéraires. En réseaux de capteurs, moins d'effort a été donnée aux protocoles de routage, même si c'est clair que les protocoles de routage ad hoc tels que DSDV (destination sequenced distance vecteur), TORA (temporally-ordered routing algorithm), DSR (dynamic source routing), et AODV (ad hoc on demand distance vector) ne sont pas adaptées pour le réseaux capteur pour la cause du type de trafic qui est "plusieurs à un" et que tous les nœuds typiquement transmettent à une seule station de base ou centre de fusion. Néanmoins, certains mérites de ces protocoles se rapportent aux caractéristiques des réseaux de capteurs, comme la communication multi-sauts et le routage QoS. Le routage peut être associé à la compression des données pour améliorer l'évolutivité du réseau.

❖ **Localisation** : un système de localisation existe déjà, qui est disponible sur toute la surface du globe le GPS. Pourtant, il n'est pas satisfaisant pour l'usage nécessaire, car il cumule les handicaps. Il est disponible seulement en extérieur, et encore si aucun obstacle ne vient obstruer le champ de vue des récepteurs : le fonctionnement sous un feuillage dense, ou dans des villes aux rues étroites, n'est pas possible, où seulement dans de très mauvaises conditions.

De plus il est particulièrement coûteux, tant en ce qui concerne le matériel – qui est dupliqué en nombreux exemplaires dans un réseau à forte densité de capteurs. De plus, la réception du signal est très gourmande en énergie, ce qui n'est pas compatible avec les problématiques de gestion de durée de vie des batteries. La localisation par moyens propres est donc indispensable. Elle se fait en deux étapes : premièrement l'estimation de la distance aux autres nœuds, et ensuite la triangulation. Le développement de nouvelles techniques de localisation est devenu un grand souci pour les réseaux sans fil de capteurs.

❖ **La sécurité** : en fonction de l'application, la sécurité peut être critique. Le réseau devrait permettre la détection des intrusions et la tolérance, ainsi qu'un fonctionnement robuste dans le cas de défaillance parce que, souvent, les nœuds capteur ne sont pas protégés contre les mauvaises manipulation ou attaques. L'écoute, le brouillage, et les

attaques de retransmission peuvent entraver ou empêcher l'opération ; par conséquent, le contrôle d'accès, l'intégrité des messages, et la confidentialité doit être garanti.

❖ **Environnement** : les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits hostiles. Ils sont soumis à différentes conditions d'environnement ; ils peuvent fonctionner sous haute pression au fond de l'océan, dans un environnement dur tel que les champs de bataille, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés ou même dans des milieux extrêmement froids. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiquement éloignées ou inaccessibles.

❖ **Agrégation des données** : Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs sont très reliées, ce qui implique l'existence de redondances de données. Une approche répandue consiste à agréger les données au niveau des nœuds intermédiaires afin de réduire la consommation d'énergie lors de la transmission de ces données.

❖ **Passage à l'échelle** : la plupart des protocoles de routage est conçu à des RCSFs de taille moyenne. Or, le nombre de nœuds déployés pour un RCSFs peut atteindre des milliers de nœuds. A cet effet, un algorithme de routage performant doit supporter le passage à l'échelle sans voir ses performances se dégradent en cas d'augmentation du nombre des nœuds.

❖ **Topologie dynamique** : la dynamique du réseau découle des défaillances des nœuds ou des cassures des liens entre ceux-ci. La disparition d'un nombre de capteurs dans le réseau, ainsi que le déploiement de nouveaux capteurs, rendent la topologie du réseau fréquemment instable. La maintenance d'un réseau est d'autant importante que le changement de sa topologie. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau.

❖ **Déploiement** : Le déploiement des capteurs est la première opération (phase) dans le cycle de vie d'un réseau de capteurs. On peut envisager plusieurs formes de déploiements selon les besoins des applications. Les nœuds peuvent être déployés aléatoirement d'un avion ou d'une roquette par exemple, ou bien ils peuvent être placés un par un d'une manière déterministe par un humain ou un robot. Dans un grand nombre d'applications, le déploiement manuel est impossible. De plus, même lorsque l'application permet un déploiement déterministe, le déploiement aléatoire est adopté dans la majorité des scénarios à cause de raisons pratiques tels que le coût et le temps. Cependant, le déploiement

aléatoire ne peut pas fournir une distribution uniforme sur la région d'intérêt, ce qui déclenche de nouveaux problèmes dans les réseaux de capteurs. Les principaux problèmes engendrés sont la localisation, la couverture de la zone, la connexité et la sécurité.

❖ **Post-Déploiement - Exploitation** : durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds ou bien à des pannes.

❖ **Redéploiement** : l'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie. Dans tous les cas, le réseau de capteurs doit pouvoir se réorganiser rapidement avec un coût énergétique réduit.

❖ **Tolérance aux pannes** : les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. La panne d'un nœud capteur ne doit pas affecter le fonctionnement global de son réseau. La tolérance aux pannes est donc la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruption due à une panne d'un nœud capteur.

1.5 Applications des réseaux de capteurs

Les domaines d'applications des RCSFs peuvent être essentiellement classés en deux catégories : surveillance et suivi. Les applications de surveillance comprennent la surveillance intérieure/extérieure de l'environnement, la surveillance du bien-être et de la santé, l'automatisation des processus et des usines, et la surveillance sismique et structurelle. Les applications de suivi comprennent la localisation et le suivi de cibles mobiles, telles que des animaux, des humains ou des véhicules. Nous décrivons ci-dessous quelques domaines d'applications des RCSFs [17] :

1.5.1 Application militaire :

Comme pour de nombreuses autres technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine.

Actuellement, les RCSFs peuvent être une partie intégrante dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance, la reconnaissance, etc.

1.5.2 Application médical

Les RCSFs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies, surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital.

1.5.3 Applications environnementales

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, etc.), détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc.) dans des sites industriels tels que les centrales nucléaires et les pétrolières.

1.5.4 Applications commerciales

Parmi les domaines dans lesquels les réseaux de capteurs ont aussi prouvé leur utilité, on trouve le domaine commercial. Dans ce secteur on peut énumérer plusieurs applications comme : la surveillance de l'état du matériel, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, etc.

1.5.5 Applications agricoles

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

1.5.6 Applications à la sécurité :

L'application des RCSFs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure.

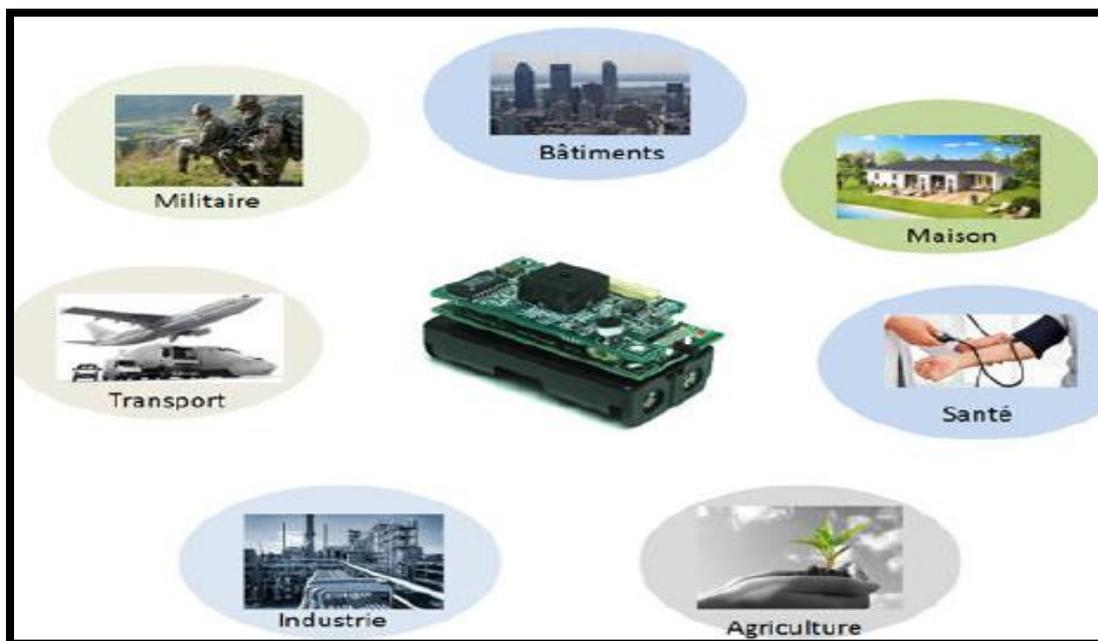


Figure 1.13 : Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil.

1.6 Techniques de conservation énergétique dans les RCSFs

Les techniques de conservation énergétique dans les RCSFs et leurs classifications ont toujours attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Ces techniques de conservation permettent généralement la mise en œuvre d'approches qui peuvent optimiser la consommation énergétique des capteurs selon leurs modes d'activités (actif, TX, RX ou sleep). L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes de capture, de traitement et de communication [7].

1.6.1 L'énergie de capture

L'énergie de capture est la partie énergétique dépensée par un nœud capteur lorsque celui-ci effectue les opérations d'échantillonnage, de conversion analogique/numérique et d'activation de son module de capture. Le coût de cette énergie dépend du type spécifique du capteur (image, son, température, etc.) et des opérations précédentes. Cette énergie est en général très faible par rapport à la quantité énergétique totale consommée par un nœud

capteur donné.

1.6.2 L'énergie de traitement

L'énergie de traitement d'un nœud capteur représente la quantité énergétique dépensée par celui-ci pendant les opérations de lecture et d'écriture en mémoire. Cette énergie est scindée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel. L'énergie de fuite représente l'énergie dissipée lorsque le processeur n'effectue aucun traitement. L'énergie de traitement est relativement faible par rapport à l'énergie dépensée durant la communication.

1.6.3 L'énergie de communication

L'énergie de communication d'un nœud capteur est divisée en deux parties : l'énergie dépensée durant la transmission de données (TX) et celle dépensée pendant la réception de données (RX). Cette énergie dépend non seulement de la quantité des données à transmettre (taille des paquets) mais également de la distance entre l'émetteur et le récepteur et le type du module de communication utilisé. En effet, la portée d'un signal dépend non seulement de sa puissance d'émission (TX power) mais également des propriétés physiques du milieu de propagation. Cependant, la puissance d'émission influe grandement sur la portée du signal. Ainsi, lorsque la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée, et par conséquent l'énergie consommée sera plus importante. L'énergie de communication représente la plus grande partie de l'énergie consommée par un nœud capteur.

1.7 Classification des techniques de conservation énergétique [18]

Dans les applications typiques des RCSFs, les nœuds capteurs, alimentés dans la plupart des cas par des sources d'énergie embarquées (les batteries), sont souvent nombreux (des milliers) et sont en général déployés dans des environnements lointains, et hostiles. Il devient par conséquent impossible de remplacer ou de recharger leurs batteries, source primordiale pour leur survie. La métrique consommation de l'énergie est un élément fondamental dans toute conception d'un RCSFs. Les efforts de recherches qui sont et qui seront déployés dans ce sens se focalisent autour du concept économie d'énergie. La problématique autour du problème d'économie d'énergie dans les RCSFs vise essentiellement à réduire l'énergie dépensée au sein d'un nœud et au sein du réseau des nœuds capteurs en activité (protocoles réseau) dans la perspective d'étendre considérablement la durée de vie du réseau. Les techniques d'économie d'énergie citées dans la littérature sont classifiées en général, en trois grandes classes : approches basées sur le cycle d'activité, approches dirigées par les données et approches basées sur la mobilité.

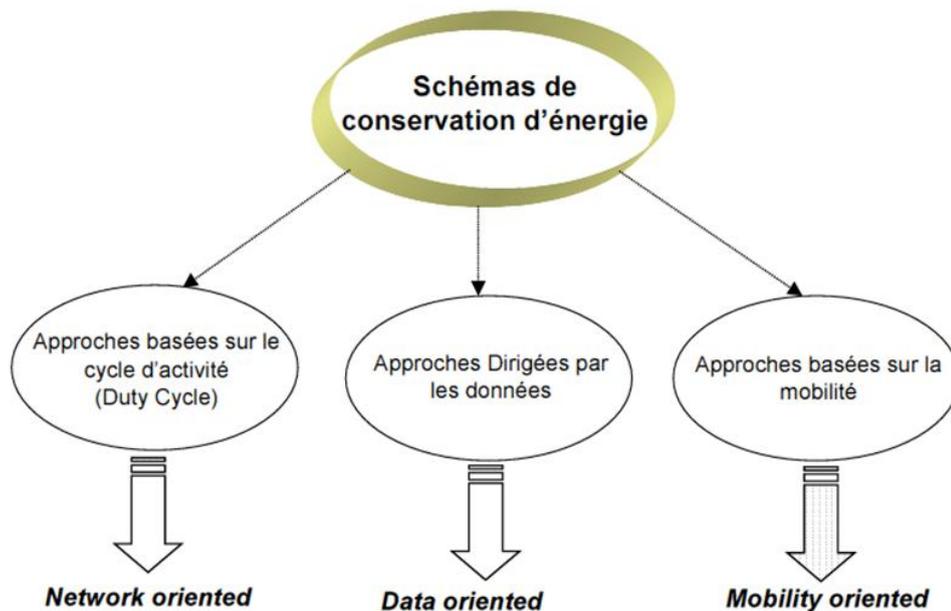


Figure 1.14: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs [18].

1.7.1 Approches basées sur le cycle d'activité

Ces approches, connues dans la littérature anglaise sous le nom de « Duty Cycling approaches », concernent essentiellement les sous-systèmes radio et de traitement qui font partie de l'architecture interne d'un nœud capteur (voir figure 1.7). L'opération la plus efficace en terme de préservation d'énergie consiste à mettre en mode veille le module

radio chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Lorsqu'il n'y a aucune donnée à envoyer ou à recevoir par le nœud capteur, le module de communication radio doit basculer vers le mode inactif et redeviendra actif chaque fois qu'il y a une présence d'une nouvelle donnée prête à être envoyée ou à recevoir. Le nœud dans ce cas bascule dans le temps entre les états actif et inactif et développe ainsi un comportement appelé cycle d'activité. Un cycle d'activité d'un nœud est défini comme étant la fraction de temps durant laquelle ce nœud est actif pendant sa durée de vie. Chaque nœud dans un voisinage d'un RCSFs effectue des tâches coopératives avec d'autres nœuds, celles-ci nécessitent une coordination efficace dans la gestion des différents cycles d'activités correspondants. Les différents basculements veille/réveil (Sleep/Wake up). Ainsi, des mécanismes de planification des modes veille/réveil doivent impérativement accompagner toute approche basée sur le concept de cycle d'activité.

1.7.2 Approches dirigées par les données

Dans ce cas, la stratégie d'économie d'énergie est fondée sur la nature des données brutes collectées par les nœuds capteurs et aussi sur la manière avec laquelle ces données sont collectées en présence d'un sous-système de capture fortement consommateur d'énergie. En effet, les données brutes collectées par les nœuds d'un RCSFs, notamment dans le cas des applications environnementales, ont souvent une forte corrélation spatiale et/ou temporelle. Ceci permet une génération de données redondantes inutiles à transmettre au puits (Sink), car leur transmission implique un gaspillage d'énergie de communication même si on admet que le coût énergétique d'une collecte est négligeable.

Les techniques dirigées par les données doivent être ainsi conçues afin de réduire la quantité de données brutes prélevées par les capteurs en assurant une qualité de capture d'un niveau acceptable vis-à-vis des objectifs de l'application considérée. Notons enfin que les techniques basées sur le cycle d'activité peuvent être aussi employées dans un processus de collecte de données.

1.7.3 Approches basées sur la mobilité

Dans le cas où certains nœuds capteurs (y compris la station de base) sont mobiles, dotés de modules de mobilité pour se déplacer dans l'espace de déploiement, la mobilité peut être exploitée pour réduire considérablement la consommation énergétique, en plus des deux techniques précédentes. Lorsque ces nœuds mobiles sont excessivement chers, ils

doivent exister en un nombre très limité parmi les nœuds formant le réseau ou parfois attachés à des plates formes mobiles déjà présentes dans l'espace de déploiement, comme par exemple des soldats dans des applications militaires ou des animaux dans certains scénarios d'applications environnementales. Le gain énergétique résultant de la mobilité des nœuds peut être justifié de différentes manières. En effet, dans un RCSFs fortement statique, il apparaît souvent que certains chemins de routage multi-sauts subissent une surcharge de trafic par rapport à d'autres chemins pour transmettre les données entre les nœuds capteurs sources et la station de base. Ce déséquilibre de charge affectera directement la durée de vie du réseau. De même, les nœuds les plus proches de la station de base sont généralement les plus sollicités lors d'une opération de routage pour relayer les données vers le Sink. Si on imagine que certains nœuds (y compris le Sink) sont mobiles, le flux de trafic peut être altéré en affectant à ces nœuds mobiles la responsabilité de collecte directe des données à partir des nœuds statiques. De cette manière, ces derniers attendent le passage du nœud mobile pour lui transmettre les données à proximité (directement ou à un nombre très restreint de sauts). Ils peuvent ainsi préserver la consommation d'énergie qui sera gaspillée dans les cas suivants : utilisation des chemins plus longs, problème de contention, trop de messages de contrôle (overhead) pour le routage des données. En plus, les nœuds mobiles peuvent également parcourir uniformément le réseau afin d'assurer un équilibre de charge énergétique en terme de communications réseau. Pour plus de détails sur l'effet de la mobilité sur la préservation d'énergie dans un RCSFs, nous invitons le lecteur à consulter les références.

1.8 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de leurs applications dans des différents domaines.

Après avoir étudié les RCSFs dans ce chapitre, détailler leur fonctionnement, leurs architectures, leurs différents domaines d'application et leurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, Les RCSFs possèdent des caractéristiques particulières qui les différencient des autres types de réseaux sans fil. Ces spécificités telles que la consommation d'énergie réduite, la scalabilité ou le routage incitent le besoin de concevoir de nouveaux protocoles d'accès au support, de routage, de

transport ou d'application, qui s'adapteront aux caractéristiques des RCSFs.

Cette mise au point nous a permis de déduire que les protocoles de routage jouent un rôle déterminant et crucial dans la conception des RCSFs. Cela nous a mené à faire une étude des principaux protocoles de routage proposés dans le chapitre qui suit.

Chapitre 2

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

2.1 Introduction

2.2 Routage

2.3 Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

2.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs

2.5 Exemples des protocoles de routage proposés pour les RCSFs

2.6 Le protocole de routage LEACH et ses variantes

2.7 Conclusion

2.1 Introduction

Les nœuds capteurs composant les réseaux de capteurs sans fils sont très limités en puissance de transmission, en capacité de traitement et de stockage de l'information et en ressources énergétiques. De même le trafic de données dans les réseaux de capteurs sans fils présente une redondance significative puisqu'il est généralement produit par plusieurs capteurs déployés dans une même zone d'observation d'un phénomène physique commun.

Ces paramètres peuvent être exploités, de manière individuelle ou combinée dans le développement des protocoles d'acheminement d'information (routage) tournant sur un réseau de capteurs sans fils qui doivent être plus simples et peu gourmands en ressources par rapport à ceux fonctionnant sur les réseaux filaires et les réseaux ad hoc.

2.2 Routage

Le routage est le processus de recherche mis en œuvre dans un réseau pour déterminer les routes qui vont acheminer les paquets d'un terminal émetteur à un terminal récepteur. On distingue généralement deux entités : l'algorithme de routage et le protocole de routage.

L'algorithme de routage est la partie du logiciel de la couche réseau qui a la responsabilité de décider sur quelle ligne de sortie un paquet entrant doit être retransmis. Le but d'un algorithme de routage est de permettre le calcul de route entre une source et une destination au sens d'un certain critère (plus court chemin par exemple), et la diffusion des informations nécessaires à ce calcul [19]. Un protocole de routage est un ensemble de règles s'appliquant au format et à la signification des trames, paquets ou messages échangés entre entités paires au sein de la couche réseau [19].

2.3 Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le routage dans les réseaux de capteurs diffère de celui des réseaux ad hoc dans les points suivants :

- ❖ Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds.
- ❖ Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées

depuis des sources multiples vers la destination finale « station de base ».

- ❖ Les différents capteurs peuvent générer produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- ❖ Les nœuds capteurs exigent ainsi une gestion soigneuse des ressources.

En raison de ces différences, de nouveaux protocoles de routage ont été proposés dans les réseaux de capteurs.

2.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs

Les protocoles de routage conçus pour les RCSF ont été largement étudiés. Ils peuvent être classés selon deux concepts :

- ❖ *Structure du réseau.*
- ❖ *Type de protocole.*

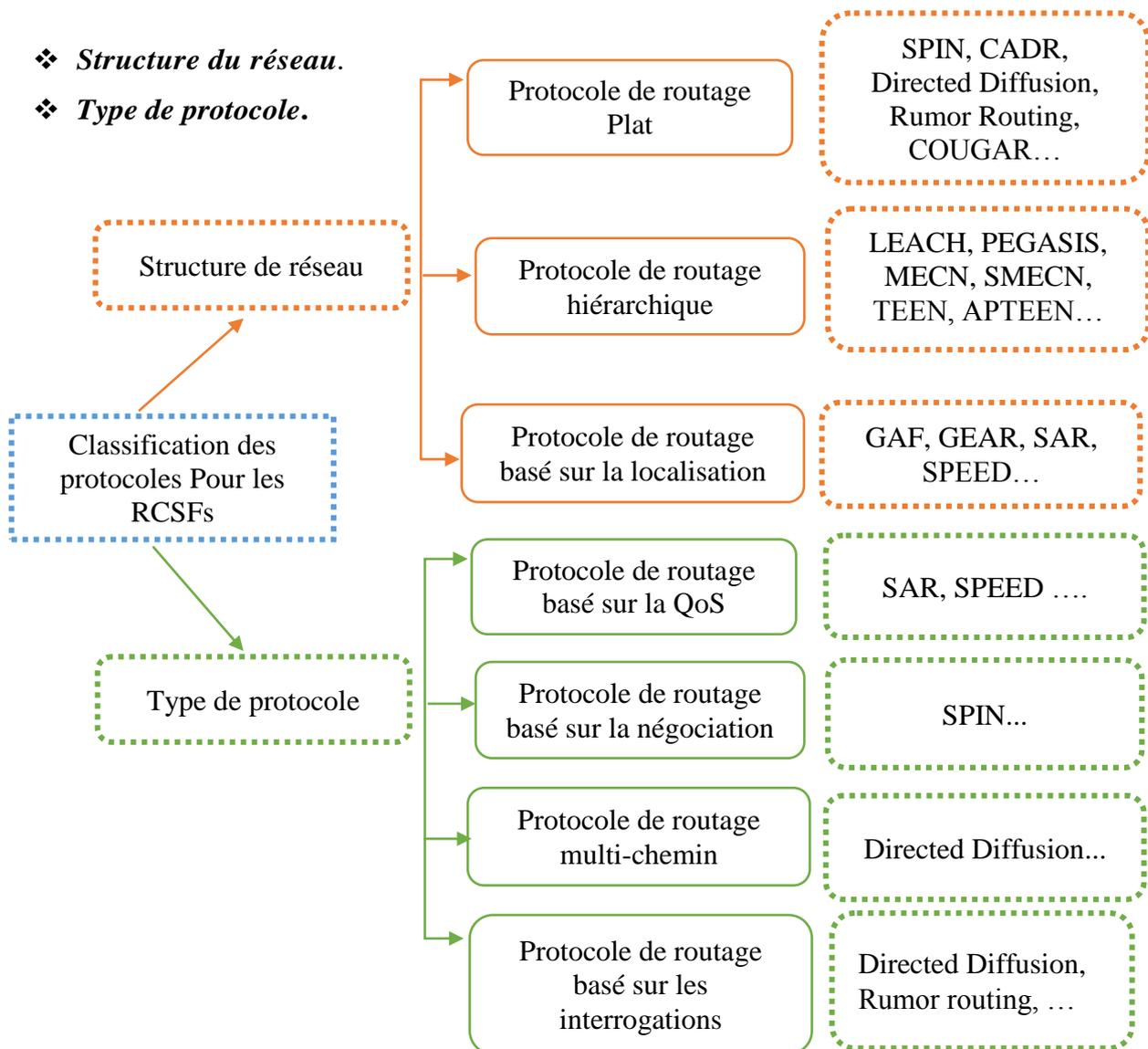


Figure 2. 1 : Classification des protocoles des protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau et le type de protocole.

2.4.1 Les protocoles de routage plat

Dans cette topologie tous les nœuds sont considérés homogènes et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire, et seul la station de base est chargé de la collecte de données issues des différents nœuds capteurs [20]. Au cas où la destination (D) ne fait pas partie du voisinage de la source(S), les données seront transmises en utilisant des sauts multiples comme l'illustre la figure2.2. Une approche Appelée également routage centré données (data centric) utilisée dans l'acheminement des données dans les RCSFs. Elle se base sur la collaboration de tous les nœuds du réseau. Les propriétés des données sont spécifiées par un système de dénomination par attribut (attribut, valeur) en raison de la difficulté d'affecter un identificateur global à chaque nœud vu leur nombre important des nœuds déployées dans le réseau [21].

Plusieurs protocoles rentrent dans cette catégorie comme : DD (Directed Diffusion) et SAR (Sequential Assignment Routing).

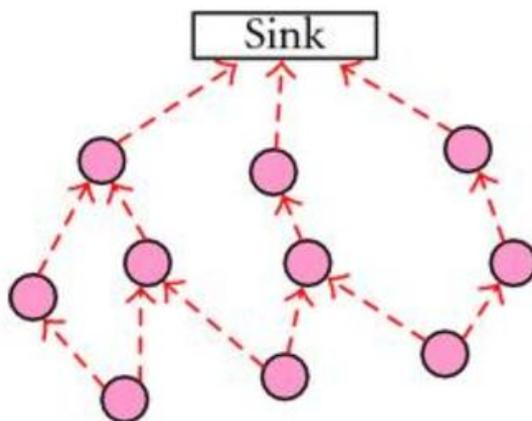


Figure2.2 : Topologie de protocole de routage plat.

2.4.2 Les protocoles de routage hiérarchique

Afin d'augmenter la scalabilité du système, les topologies hiérarchiques ont été introduites en divisant les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité. L'une des méthodes les plus employées est le clustering, où le réseau est partitionné en groupes appelés "clusters". Un cluster est constitué d'un chef (cluster-head) et de ses membres [22].

L'objectif principal de l'approche de clustering est de maintenir efficacement la consommation d'énergie de nœuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-hop au sein d'un cluster et en effectuant l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la station de base. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical) [23] est l'une de premières approches de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs.

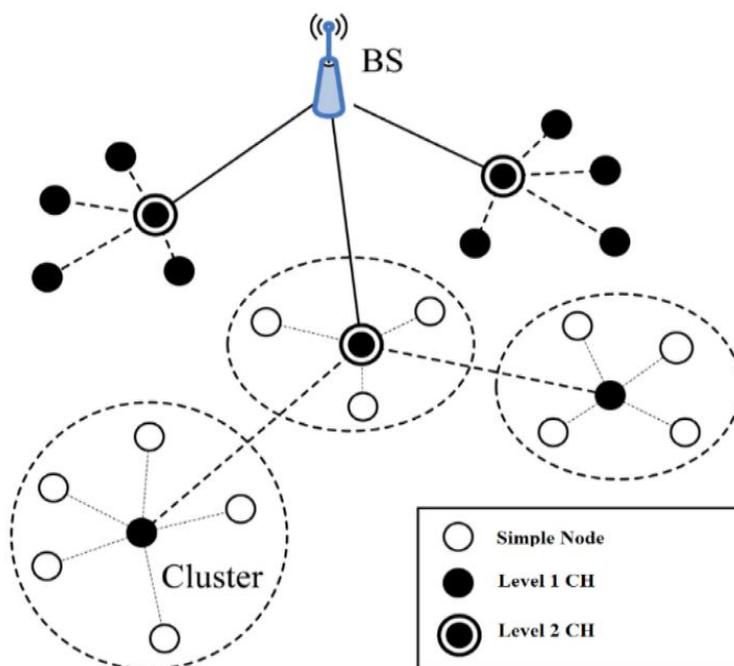


Figure 2. 3 : Routage hiérarchique [24].

2.4.3 Les protocoles de routage avec localisation géographique

Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations

Le protocole de routage basé sur la localisation utilise des informations de localisation des nœuds pour guider la découverte du routage, pour la maintenance ainsi que pour le transfert de données. Il permet en outre la transmission directionnelle de l'information et évite l'inondation tout le réseau [25].

Des informations de localisation sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers, de sorte que la consommation d'énergie peut être estimée et réduite :

❖ Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS, soit un système logiciel comme un protocole de localisation.

❖ Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de

localisation doit être utilisé.

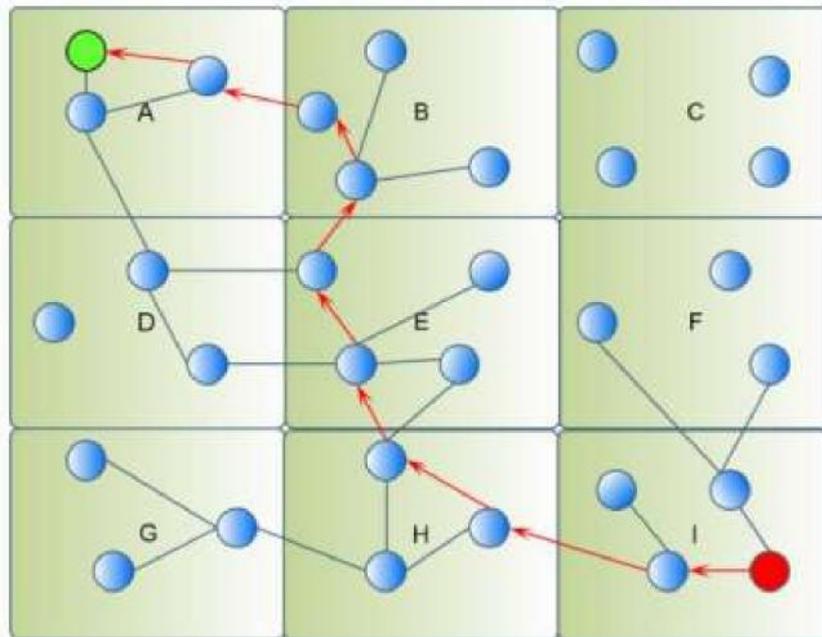


Figure 2.4 : Protocoles de routage avec localisation géographique.

2.4.4 Protocole de routage multi-chemin

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

2.4.5 Protocole de routage basé sur la négociation des données

Les nœuds déployés d'une manière denses inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés META-DATA. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre [26]. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

2.4.6 Protocole de routage basé sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des

interrogations envoyées par le nœud sink .

2.4.7 Protocole de routage basé sur la QoS

Le réseau doit répondre aux certaines métriques lors de la transmission des données captées de champ de capteurs vers la station principale. Parmi ces métriques, nous citons : l'efficacité énergétique, la fiabilité, la disponibilité, et la sécurité [27]. Cependant, les exigences QoS dans les RCSFs, telles que le délai d'agrégation, la couverture, la tolérance aux pannes et la durée de vie du réseau, sont spécifiques aux domaines applications [28].

2.5 Exemples des protocoles de routage proposés pour les RCSFs

Nous citons dans cette section quelques protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs sans fil :

2.5.1 Protocoles de routage hiérarchiques

❖ **LEACH** : Heinzelman [29] a introduit un algorithme de classification pour les réseaux de capteurs, appelé LEACH (Low Energy Adaptive Hierarchical Clustering). LEACH choisit aléatoirement des nœuds dans le réseau et leur attribue le rôle de cluster-head. Par la suite d'autres nœuds rejoignent les cluster-heads et forment ainsi les clusters. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les autres nœuds du cluster en un seul paquet et l'envoient à la station de base.

❖ **PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)** : ce protocole est une version améliorée de LEACH, il a été proposé en 2002 par Lindsey et Raghavendra. Dont l'idée principale est de former une chaîne entre les nœuds de telle sorte que chaque nœud reçoive et communique à un voisin proche, les données collectées sont transmises d'un nœud à un autre jusqu'à ce qu'elle arrive à un nœud particulier (leader) qui agrège les données reçues et les transmet à la station de base [30]. Dans PEGASIS, les nœuds qui font la transmission de données à la station de base sont choisis tour à tour en utilisant la politique "Round-Robin" (c'est-à-dire Tourniquet), Afin de minimiser l'énergie dépensée par un nœud durant chaque round, la station de base calcule cette chaîne et la diffuse à tous les nœuds de réseau[24].

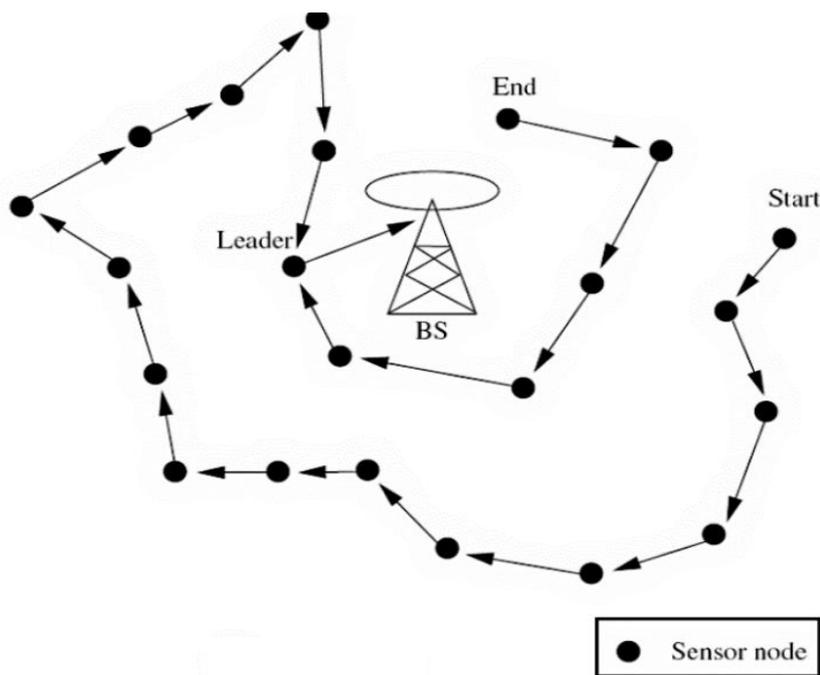


Figure 2.5: Illustration de protocole PEGASIS [24].

❖ **TEEN et APTEEN** : le protocole TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) et son extension le protocole APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) sont des protocoles de routage hiérarchiques orientés données qui conviennent aux applications sensibles à des changements soudains des attributs de la zone à surveiller. En effet, ces deux protocoles ont une réactivité importante à des changements improvisés des valeurs captées par les nœuds capteurs. De plus, APTEEN possède des caractéristiques supplémentaires par rapport au protocole TEEN lui permettant de répondre plus rapidement aux besoins des utilisateurs des applications temps réel en modifiant les paramètres, notamment la périodicité, du protocole TEEN [34].

2.5.2 Protocoles de routage non hiérarchiques

❖ **AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)** : dans AODV [33] chaque nœud, maintient une table de routage. L'entrée de la table de routage pour une destination contient trois champs essentiels : le nœud de saut suivant (next hop), un numéro de séquence (sequence id) et un nombre de sauts (hop count). Les nœuds découvrent les routes dans des cycles de demande-réponse. Un nœud demande un itinéraire vers une destination en diffusant un message RREQ à tous ses voisins. Quand un nœud reçoit un message RREQ mais ne dispose pas d'un itinéraire vers la destination demandée, elle diffuse à son tour le

message RREQ. Ce nœud se souvient aussi d'une inversion de trajet vers le nœud demandeur, qui peut être utilisé pour transmettre des réponses ultérieures à ce RREQ. Ce processus se répète jusqu'à ce que le RREQ atteigne un nœud qui possède une route valide vers la destination. Dans notre cas, chaque nœud, en recevant un RREQ, le renvoie vers tous ces voisins, dont même la source qui l'absorbe. On utilise aussi un TTL qui est temps maximal (ou nombre de sauts) au bout duquel on envoie un nouveau RREQ avec un numéro de séquence plus élevé si on ne reçoit pas une réponse du nœud destination ou d'un nœud qui connaît un chemin valide vers la destination.

La destination recevant le RREQ choisit une nouvelle source parmi ces voisins, ce nœud destination devient la source et démarre un nouveau cycle en envoyant un nouveau

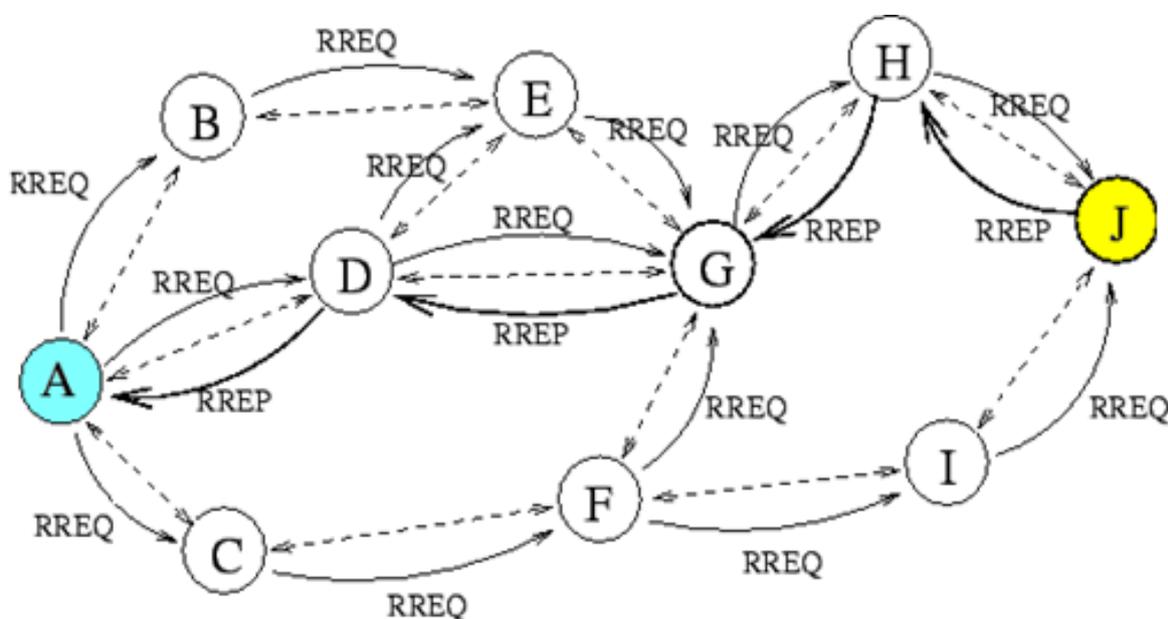


Figure 2.6 : Mécanisme de détection de route possible par AODV entre A et J.

message RREQ.

❖ **SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)** : ce protocole [32] est conçu essentiellement pour pallier aux problèmes liés à l'utilisation de la technique de « flooding » classique comme, l'envoi des données redondantes et l'ignorance des ressources. SPIN utilise une structure nommée méta-data qui décrit les données recensées lors de la négociation de l'envoi des données. De cette façon, les données réelles ne seront transmises que si une demande explicite est formulée. Il fonctionne en trois (03) étapes avec trois (03) types de messages : ADV pour diffuser ou disséminer les méta-data recensés, REQ pour

solliciter l'envoi des données requises et DATA pour transmettre les données physiques sollicitées. D'autres variantes de SPIN sont proposées pour combler les lacunes de la version originale telles que : SPINCBC, SPINCPP, SPINCEC, SPINCRLL

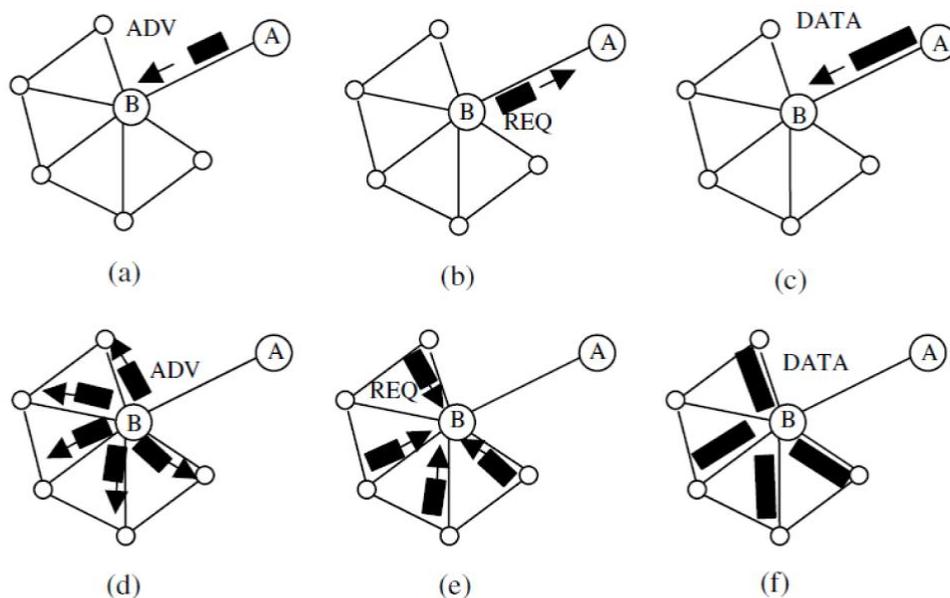


Figure 2.7 : Etapes de fonctionnement du protocole SPIN.

❖ **DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)** : Il est basé sur l'idée classique de l'algorithme distribué de Bellman-Ford en rajoutant quelques améliorations. Chaque station mobile maintient une table de routage qui contient : toutes les destinations possibles, le nombre de nœuds (ou de sauts) nécessaires pour atteindre la destination et le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un nœud destination.

Périodiquement, des diffusions sont faites pour actualiser la table de routage. Pour éviter le bouclage (loop-freedom), DSDV utilise les numéros de séquence pour mettre à jour les nouvelles routes qui sont disponibles pour atteindre des nœuds cibles. Une route R est favorisée à une route R', si R a un numéro de séquence plus grand que celui de R'. Si dans le cas où les deux ont un même numéro de séquence, alors la route possédant un minimum de saut est sélectionnée. Le numéro de séquence commence par le nœud émetteur et est incrémenté pour chaque nouvelle route trouvée. Quand le nœud trouve une actualisation vers une destination donnée, il met à jour le nombre de sauts vers cette destination et incrémente son numéro de séquence [35].

Le tableau suivant présente la comparaison de protocoles de routage décrit avant :

Tableau 2.1 : Comparaison des protocoles LEACH, PEGASIS, TEEN, SPIN, AODV, DSDV.

| | LEACH | PEGASIS | TEEN | SPIN | AODV | DSDV |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|
| Type de réseau | RCSFs | RCSFs | RCSFs | RCSFs | ad hoc | ad hoc |
| Classification | Hiérarchique | Hiérarchique | Hiérarchique | Plat | Plat | Plat |
| Chemin de transmission | Un seul saut | Multi-saut | Multi-saut | Multi-saut | Multi-saut | Multi-saut |
| Efficacité énergétique | Haut | Maximum | Haut | limité | limité | limité |
| Métrique | Energie | Energie | Energie | Energie | Chemin | Chemin |
| Temps réel | Assez bien | Assez bien | Bien | Assez bien | Très bien | Bien |
| Qos | Non | Non | Non | Non | Oui | Non |
| Basée sur requête | Non | Non | Non | Oui | Oui | Oui |
| Over Head | élevé | basse | élevé | basse | élevé | élevé |

2.6 Le protocole de routage LEACH et ses variantes

La hiérarchie de regroupement d'adaptation à faible énergie (LEACH) proposé par Heinzelman et al. [29] est un protocole de routage hiérarchique bien connu appliqué dans les RCSFs.

LEACH divise le réseau en zones et clusters de façon distribuée, des nœuds CH

(Cluster-Head) sont constitués puis utilisés comme relais pour atteindre le puits en optimisant la consommation d'énergie suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe (CH) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds du réseau. Un nœud décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus.

A la formation des groupes comme indique la figure 1, tous les nœuds non-CH transmettent leurs données à la tête du groupe. Quand le CH reçoit les données de tous les membres du groupe, il effectue des fonctions de traitement sur les données (agrégation et compression des données), et les transmet à la station de base (BS) selon une communication unicast (à un seul saut).

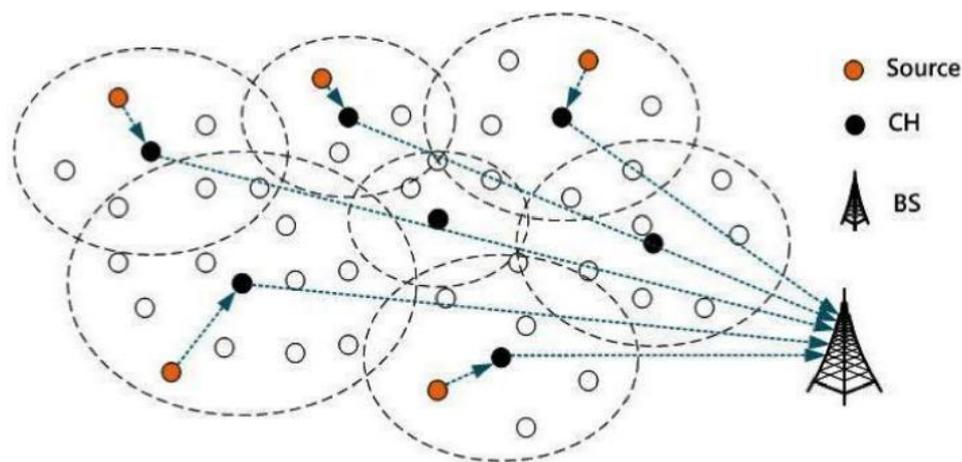


Figure 2.8 : Architecture de protocole hiérarchique LEACH.

2.6.1 Algorithme détaillé de LEACH

L'algorithme se déroule en rounds (tours) qui ont approximativement le même intervalle de temps déterminé au préalable. Où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission [36].

❖ Phase d'initialisation (Setup phase)

La phase d'initialisation est composée de 3 sous phases : d'annonce, d'organisation des groupes et enfin d'ordonnancement.

❖ Phase d'annonce

Initialement, lorsque les groupes sont créés, chaque nœud décide ou non de devenir un CH pour le tour courant. Cette décision est basée sur le suggéré pourcentage de CHs pour le réseau et le nombre de fois que le nœud a été un CH jusqu'ici. Cette décision est faite par le nœud en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre est inférieur à un seuil $T(n)$ le nœud devient un CH pour le cycle actuel. Le seuil est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{Equation 2.1})$$

- p est le pourcentage souhaité de CH c'est-à-dire choisi comme $p = 0,05$ pour une condition optimale;
- r est le tour courant ;
- G est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CHs lors des $(1/p)$ tours précédents.

Chaque nœud est donné une probabilité égale de $(1/p)$ de devenir CH afin de partager la charge de l'énergie. Ainsi, lors du commencement d'un tour, chaque nœud a une probabilité égale de devenir un CH.

Les nœuds qui étaient CHs doivent attendre jusqu'à $(1/p)$ tours, donc augmenter la probabilité contribue à augmenter la chance pour les non CH de devenir CH. Les nœuds sont de nouveau admissibles à devenir CHs si et seulement si tous les nœuds ont obtenu une fois la qualité de CH. Tout nœud après $((1/p) - 1)$ tours sera de nouveau élu CH en supposant que chaque nœud possède et dissipe une quantité égale d'énergie à des fins de transmission.

Chaque nœud qui se sera désigné CH pour le tour courant diffuse un message d'initialisation vers le reste des nœuds l'entourant. Lors de cette phase d'initialisation, les CHs utilisent le protocole MAC (Media Access Control) CSMA (Carrier Sense Multiple Access). En utilisant le même niveau d'énergie, tous les CHs diffusent leur message d'initialisation qui contient l'ID du nœud et un entête distinguable. Les autres nœuds doivent maintenir leurs récepteurs à l'écoute afin d'entendre les messages diffusés par les CHs, et chacun de ces nœuds décide quel

groupe rejoindre pour le tour courant en se basant sur la puissance des messages reçus de la part des CHs. Plus un nœud est proche du CH, plus le signal reçu sera puissant, indiquant à celui-ci qu'il aura besoin de moins d'énergie pour transmettre ses données vers le CH. Si deux signaux reçus ont la même puissance, alors le CH à rejoindre est choisi aléatoirement.

❖ Phase d'organisation des groupes

Après que chaque nœud ait choisi quel groupe rejoindre, le CH doit être informé des nœuds composant son groupe. Chaque nœud non-CH transmet une requête de rattachement vers le CH choisi en utilisant également un protocole CSMA MAC. Ce message ou requête de rattachement se compose de l'ID du nœud, de l'ID du CH et d'un entête. Durant cette phase, tous les CHs doivent maintenir leurs récepteurs allumés.

❖ Phase d'ordonnancement

Après avoir reçu les requêtes de tous les nœuds l'ayant rejoint, le CH leur alloue chacun un tour dans un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) en se basant sur le nombre de nœuds. Et ce n'est que pendant le temps qui leur est alloué que les nœuds peuvent transmettre leurs données vers le CH.

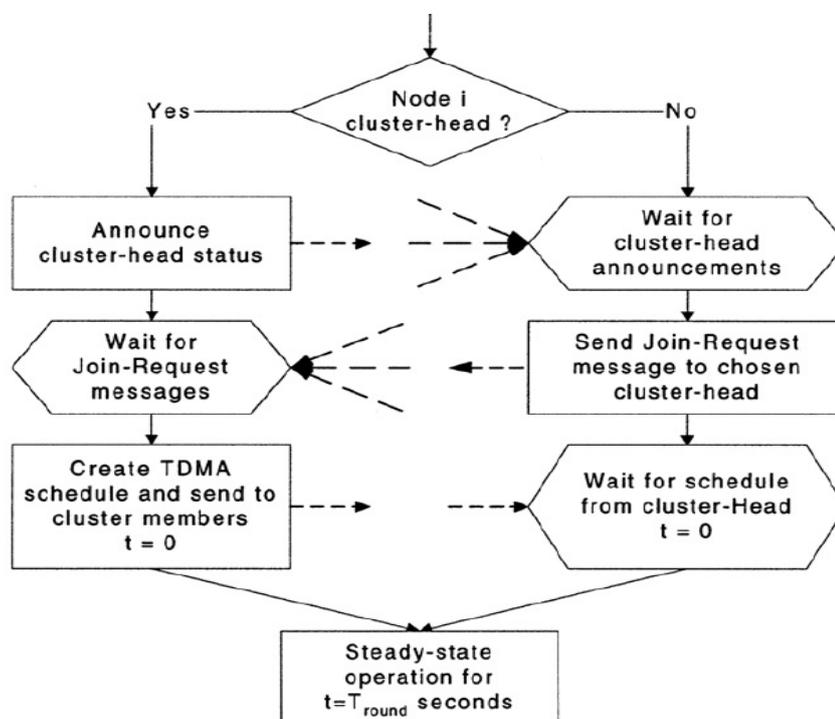


Figure 2.9: Organigramme de Set-up phase protocole LEACH [65].

❖ Phase de transmission (Steady phase)

Une fois que les groupes se sont organisés et le programme TDMA mis en place, la transmission de données commence avec l'hypothèse que les nœuds ont toujours des données à transmettre, mais ces données ne sont envoyées à la station de base que pendant l'intervalle de temps alloué au nœud. Ce type de transmission requiert une énergie minimale pour la transmission. Les autres nœuds membres du groupe, dont ce n'est pas le tour, doivent éteindre leurs transmetteurs afin d'éviter la dissipation inutile d'énergie. Mais le CH doit garder son récepteur allumé durant le tour courant pour recevoir toutes les données envoyées par les nœuds membres, après quoi il exécute les fonctions de traitement du signal afin de former un signal unique à transmettre. Cette agrégation de données est alors envoyée à destination de la station de base. Le coût en énergie pour le CH est toujours supérieur à celui des membres à cause des différentes actions qu'il doit entreprendre et à cause de l'énergie nécessaire pour transmettre vers la station de base qui se trouve plus loin que la distance qui le sépare des nœuds membres. Cela donne la phase d'état stable. Après que la transmission des données soit terminée, le prochain tour de sélection des CHs commence pour ce cycle là comme expliqué dans la phase d'initialisation.

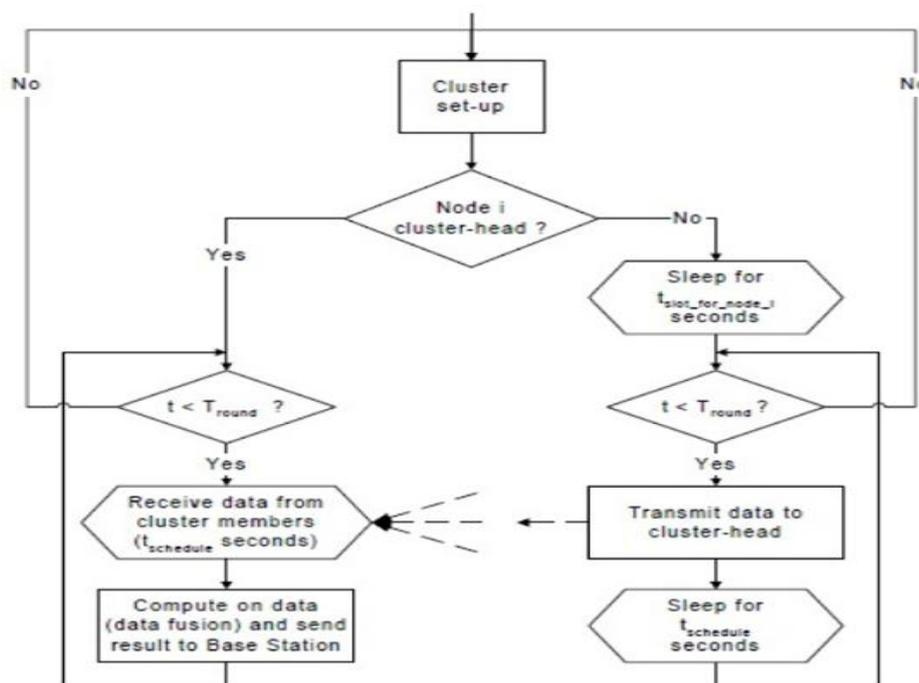


Figure 2.10: Organigramme de Steady phase protocole LEACH [66].

❖ Interférences entre groupes

Dans ce qui précède, nous avons montré comment les nœuds communiquent avec leurs CH et les CHs avec la station de base. Ces communications ayant lieu par signaux radio, les transmissions des nœuds d'un groupe donné peuvent interférer avec celles d'un groupe voisin. Ainsi, afin de réduire ces interférences, lorsqu'un nœud devient CH, il choisit parmi une liste éparsée de codes CDMA (Code Division Multiple Access), celui qu'il désire utiliser et il informe tous les autres nœuds de son groupe de son choix. Ils utiliseront alors ce code-là lors de leurs futures transmissions et le CH filtrera les signaux reçus en utilisant ce même code afin de reconnaître ceux émis par les membres de son groupe.

L'assignement effectif des canaux de communication est une tâche difficile même en la présence d'une supervision centralisée. Et l'utilisation des codes CDMA n'est peut-être pas une solution optimale à l'égard de la bande passante mais elle produit une solution pour le problème de l'accès multiple d'une manière distribuée.

a. Avantages : parmi les avantages du protocole LEACH [37,38] :

- ❖ Il fournit la scalabilité (évolutivité) dans le réseau en limitant la plupart des communications à l'intérieur des différents groupes (clusters) du réseau.
- ❖ Les cluster-heads agrègent ou fusionnent les informations rassemblées par les nœuds capteurs, ce qui aide à limiter le trafic produit dans le réseau. Ainsi, un réseau à grande échelle sans surcharge de trafic peut être déployé et une meilleure topologie préservant l'énergie peut être réalisée en comparaison à la topologie plate.
- ❖ La propriété de distributivité du rôle de CH entre les membres d'un cluster.
- ❖ Il ne requiert pas d'information sur la localisation des nœuds capteurs dans le réseau afin de former les groupes.

b. Inconvénients : le protocole LEACH présente les inconvénients suivants [39, 40] :

- ❖ Il s'appuie significativement sur les CHs plutôt que sur les nœuds membres du cluster pour communiquer avec la station de base. De ce fait, il encourt des problèmes de robustesse comme la défaillance des CHs.
- ❖ Les CHs ne sont pas uniformément distribués dans le cluster, ce qui signifie que les CHs peuvent se situer sur les bords du cluster. Par conséquent, certains nœuds n'auront pas de CH dans leurs voisinages.

- ❖ Il n'y a pas de communication intergroupe dans le réseau car les CHs communiquent directement avec la station de base. Ce processus nécessite une grande gamme de puissance de transmission dans le réseau. C'est pour cela que LEACH n'est pas le mieux adapté pour les réseaux de grande envergure qui requièrent une communication à un seul saut avec la station de base.
- ❖ Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.
- ❖ On pourra ne pas avoir des CH durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité $T(n)$.

2.6.2 Les variantes de LEACH

LEACH est un protocole hiérarchique de routage de base qui a donné naissance aux variantes suivantes :

❖ **Centralized Low Energy Adaptive Clustering hierarchy(LEACH-C)**

Ce protocole [41] est une version améliorée du protocole LEACH, qui adopte presque les mêmes étapes que lui, mais avec une méthodologie de structuration totalement différente. Cependant, sa phase d'état stable est la même que celle de LEACH. Par contre, lors de la phase d'initialisation, ce protocole agit différemment et essaye d'assurer une distribution uniforme de CHs. Tous les nœuds du réseau transmettent à la station de base des informations sur sa localisation (en utilisant GPS) ainsi que sur son niveau d'énergie. Dès lors, la station de base va utiliser ces informations globales sur le réseau pour produire une meilleure structuration en clusters, en calculant le nombre optimal de ces clusters par un protocole d'optimisation, tout en se basant sur la moyenne des niveaux d'énergie. Et donc, elle va affecter pendant chaque itération, des rôles pour les différents nœuds ; CH ou capteur simple. Les nœuds ayant un niveau d'énergie supérieur à la moyenne sont élus comme CHs. Dès que le nombre optimal de clusters est déterminé, la station de base annonce les identités de CHs par une diffusion de messages dans le réseau. Pour continuer le fonctionnement de ce protocole de la même façon que LEACH.

- a. **Avantages** : LEACH-C permet une diminution remarquable de la consommation énergétique

- b. Inconvénients :** la version centralisée n'est pas adaptée aux réseaux de grande dimension, due à l'over Head engendrée dans le réseau suite au grand nombre de messages échangés.

❖ **Fixed number of cluster Low Energy Adaptive Clustering Hierarch(LEACH-F)**

Le protocole LEACH-F a été proposé pour minimiser le coût de l'over Head lors de la formation des clusters. Ainsi, dans LEACH-F, les clusters sont formés une seule fois et le rôle de cluster Head tourne parmi les nœuds membres du même cluster [42].

- a. Avantages :** élimination des frais généraux de la re-clustering dans LEACH de base. Une fois que le nombre fixe de cluster est formé ; ils sont maintenus tout au long du réseau.

- b. Inconvénients :** Ce protocole ne fournit aucune possibilité d'ajouter ou de retirer les nœuds une fois les clusters sont formés et les nœuds ne peuvent pas ajuster leur comportement sur le nœud mort.

❖ **Balanced Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-B)**

LEACH-B utilise l'approche décentralisée de la formation de cluster dans laquelle chaque nœud de capteur connaît sa propre position et la position de destination finale, indépendamment de la position du reste des nœuds du réseau. LEACH-B fonctionne en trois étapes : sélection du CH, formation des Clusters et transmission de données avec accès multiples. Selon l'énergie dissipée dans le chemin entre un nœud et un récepteur final, chaque nœud choisit son CH [43].

- a. Avantages :** meilleure efficacité énergétique que le protocole LEACH de base.
- b. Inconvénients :** la distance doit être considérée encore pour le meilleur choix de CH et ce protocole dépend d'une distance limitée.

❖ **Two level Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(TL-LEACH)**

Contrairement au protocole LEACH où les CHs envoient des données à la station de base directement en un seul saut, le protocole TL-LEACH fonctionne dans la

hiérarchie à deux niveaux. Les données agrégées de chaque CH sont recueillies par un CH qui se trouve entre les CHs et la station de base, au lieu d'envoyer directement à la station de base [44].

- a. **Avantages** : ce protocole réduit l'énergie de transmission de données. Les CHs meurent tôt par rapport à d'autres nœuds, loin de la station de base et TL-LEACH améliore l'efficacité énergétique en utilisant un CH comme nœud de relais entre les CHs de cluster.
- b. **Inconvénients** : frais généraux supplémentaires pour l'élection des CHs secondaires et la formation des clusters.

❖ Energy Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-E)

Dans le protocole LEACH-E, d'abord tous les nœuds ont la même énergie et même probabilité de devenir CH. Après le premier tour, le niveau de chaque nœud change. Ensuite, la quantité d'énergie résiduelle de chaque nœud est utilisée pour sélectionner des CHs. Les nœuds avec la plus haute énergie résiduelle sont préférés sur le reste des nœuds [43].

- a. **Avantages** : LEACH-E améliore la durée de vie du réseau en équilibrant la charge de l'énergie entre tous les nœuds du réseau.
- b. **Inconvénients** : Le réseau doit être équipé de GPS pour déterminer la position des nœuds et de CH.

❖ Multi-Hop Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (MH-LEACH)

Dans le protocole LEACH, les CHs envoient des données à la station de base directement quel que soit la distance entre eux. Cela entraînera la dissipation d'énergie élevée du nœud principal du cluster si la station de base est située loin de là. Comme le diamètre de réseau augmente, la distance entre la station de base et CHs augmente. Pour accroître l'efficacité énergétique du protocole, la communication multi chemin est introduite. Tout d'abord les nœuds membres du cluster envoient des données à leurs CH respectifs qui transfèrent les données vers un autre CH plutôt puis au station de base directement [45].

- a. **Avantages** : ce protocole adapte un chemin optimal entre les CHs et la station de base.
- b. **Inconvénients** : ce protocole n'est pas adapté pour que le CH utilise d'autres

itinéraires possibles de sa table dans un rond tenant compte de la batterie restante dans les CHs voisins.

❖ **Mobile Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-M)**

Le protocole LEACH-M a été proposé pour la délivrance de la mobilité dans le protocole LEACH. Ce protocole assure la mobilité des CHs non-cluster et CHs par rapport à la mise en place et à l'état d'équilibre. Les nœuds sont homogènes et l'emplacement de chaque nœud est calculé par GPS [46].

- a. **Avantages** : les nœuds à mobilité minimale et la plus faible atténuation sont sélectionnés en tant que CHs et le rôle des CHs est diffusé à tous les nœuds dans sa plage de transmission.
- b. **Inconvénients** : le seuil de vitesse et les modèles de temps ronds devraient être développés pour l'utilisation de ce protocole. La surveillance d'endroit est des frais généraux sont coûteux.

❖ **Improved Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (I-LEACH)**

La détection de nœuds jumeaux et l'affectation des Sous-Clusters Head (SCH) nœuds sont les deux fonctions desservies par le protocole amélioré-LEACH. Aléatoirement, le déploiement de nœuds entraîne une forte probabilité d'avoir deux nœuds situés très près l'un de l'autre, appelés jumeaux. Il est nécessaire de garder un sommeil de nœud jusqu'à ce que l'énergie d'un autre nœud épuise. Par conséquent, I-LEACH a une distribution uniforme de CH qu'il ne manque pas d'énergie lorsque la transmission est plus à distance à lieu [43].

- a. **Avantages** : ce protocole utilise l'approche de seuil pour la gestion de nombre de membres du cluster pour chaque CH dans le réseau à un moment.

❖ **Advanced Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-A)**

Parmi les inconvénients du protocole LEACH, on peut citer la consommation d'énergie du CH par rapport aux nœuds normaux. Le protocole A-LEACH est considéré comme un protocole hétérogène utilisé dans le but de diminuer les probabilités des nœuds défaillants ainsi que le prolongement de l'intervalle de temps avant la mort du

premier nœud (appelée période de stabilité). Dans A-LEACH, chaque capteur connaît le départ de chaque tour et cela en utilisant l'horloge synchronisée [43].

- a. Avantages :** un algorithme distribué où la configuration des clusters est indépendante de la station de base. Les techniques TDMA/ CDMA permettant la hiérarchie des groupes à différents niveaux ; économise un maximum d'énergie.
- b. Inconvénients :** ce protocole consomme plus d'énergie lors de la transmission de l'information à station de base.

❖ Cell Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (Cell-LEACH)

Dans Cell-LEACH, RCSF est divisé en plusieurs groupes où chaque groupe est divisé à son tour en 7 sections appelées cellules. Plusieurs capteurs sont inclus dans chaque cellule à partir de laquelle un nœud de capteur est sélectionné comme Cell Head. Une fois formés, les groupes et les cellules ne peuvent plus être modifiés. Chaque nœud de la cellule envoie des données à Cell Head à l'heure désignée donnée par TDM. La fonction d'agrégation des données est effectuée par les Cell Head et les données traitées sont envoyées aux station de base [47].

- a. Avantages :** cell Head supprime les informations redondantes. Une agrégation de données est effectuée aux informations reçus de différentes sources.
- b. Inconvénients :** CH et Cell HEAD sont déterminés d'une manière au hasard.

❖ Multi Group based (MG-LEACH)

C'est un protocole de rendement optimum de cheminement basé sur LEACH, ce dernier consiste une approche de trois étapes : Les deux premières correspondent à celles de LEACH, qui sont la phase de l'installation et la phase de régulation d'état, pour la troisième étape qui est la phase de construction où les nœuds sont distribués en sous-groupes selon leurs positions. Chaque nœud qui est équipé de GPS fait suivre à l'information de localisation directement vers la station de base. La station de base utilise cette information pour chaque phase de construction d'ensemble [48].

- a. Avantages :** La durée de vie du réseau est augmentée cela est dû à la redondance de ces composants (nœuds).

Tableau 2.2 : Comparaison entre LEACH et ses différentes variantes. [43].

| | Année | Mobilité | Scalabilité | Organisation auto | Nombre de sauts | Informations de localisation |
|------------|-------|--------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| LEACH | 2002 | puits fixe | Limitée | Oui | Unique itinéraire | Non |
| LEACH-C | 2002 | puits fixe | Bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| LEACH-F | 2002 | puits fixe | Limitée | Non | Unique itinéraire | Oui |
| LEACH-B | 2003 | puits fixe | Bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| TL-LEACH | 2005 | puits fixe | Très bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| LEACH-E | 2007 | puits fixe | Très bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| MH-LEACH | 2007 | puits fixe | Bonne | Oui | Multi chemins | Oui |
| LEACH-M | 2008 | puits mobile | Très bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| I-LEACH | 2009 | puits fixe | Très bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| LEACH-A | 2010 | puits fixe | Bonne | Oui | Unique itinéraire | Oui |
| Cell-LEACH | 2012 | puits fixe | Très bonne | Oui | Multi chemins | Oui |

| | | | | | | |
|--------------|------|---------------|---------------|-----|------------------|-----|
| MG- LEACH | 2012 | puits fixe | Très bonne | Oui | Multi chemins | Oui |
|--------------|------|---------------|---------------|-----|------------------|-----|

2.7 Conclusion

Le routage dans les RCSFs forme un axe de recherche intéressant, avec leurs défis majeurs est de trouver des protocoles de routage qui permettent, à la fois, de :

- ❖ Consommer le moins d'énergie possible ;
- ❖ Assurer la connectivité du réseau ;
- ❖ Assurer une livraison fiable et rapide ;
- ❖ Tolérer aux pannes ;
- ❖ S'adapter aux changements de topologie ...

Différents protocoles de routage sont proposés dans le domaine de RCSFs sur l'optimisation de la consommation d'énergie. Dans ce qui suit, nous visons à présenter l'algorithme de chauves-souris et quelques travaux antérieurs.

Chapitre 3

Algorithme de chauves-souris et travaux antérieurs

Sommaire

3.1 Introduction

3.2 Comportement, Echolocation et Ultrason des chauves-souris

3.3 Domaine d'applications

3.4 Travaux antérieurs

3.5 Conclusion

3.1 Introduction

Un nombre très important d'algorithmes de clustering ont été créés pour les RCSFs. Il y a eu différents types d'approches heuristiques et inspirées de la nature ont été proposées pour développer des protocoles de routage plus efficaces pour la transmission de données et la consommation d'énergie dans les RCSFs.

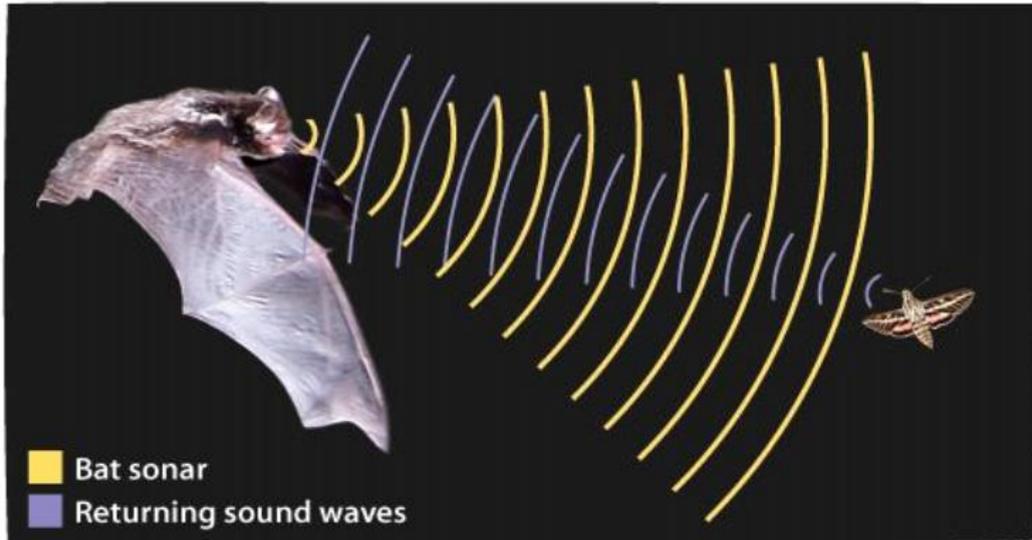
Dans ce chapitre nous allons aborder brièvement le comportement d'écholocation des chauves-souris, ensuite nous allons détailler l'algorithme des chauves-souris, leurs différents variant et domaines d'application, et à la fin de ce chapitre nous allons présenter quelques travaux connexes concernant l'application de cet algorithme dans économie de l'énergie dans les RCSFs.

3.2 Comportement, Echolocation et Ultrason des chauves-souris

La chauve-souris est un animal surtout nocturne qui dort pendant la journée et qui chasse et se nourrit la nuit. La chauve-souris n'est pas aveugle. Les yeux de nombreuses espèces de chauves-souris insectivores ne sont pas apparents, mais les chauves-souris voient très bien et se servent de leurs yeux au cours de nombreuses activités ; Il existe environ 996 espèces [49][51]. Leurs tailles variant entre la chauve-souris bourdon dite microchiroptère ou « microbat » en anglais d'un poids d'environ 1,5g à 2g jusqu'à la chauve-souris géante, dite mégachiroptère ou « megabat » en anglais avec une envergure d'environ 2 mètres et un poids jusqu'à 1 kg. Les microchiroptères ont un corps d'une longueur variant de 2,2 à 11cm. La plupart des chauves-souris utilisent l'écholocation à un certain degré ; parmi toutes les espèces, les espèces se sont les plus nombreuses qui se nourrissent d'insectes les repèrent en vol et dans l'obscurité, par un système d'écholocation très perfectionné qui leur permet aussi d'éviter les obstacles [50].

Elles émettent des sons très aigus à l'aide de leurs cordes vocales. Ces ultrasons transmis par le nez ou la gueule ont une fréquence oscillante entre 20 et 120 kilohertz (kHz). La plupart sont imperceptibles pour l'oreille humaine qui perçoit des fréquences de l'ordre de 15 à 20 kHz environ. La chauve-souris cendrée est la seule espèce qui peut émettre des ultrasons inférieurs à 20 kHz perceptibles par l'homme.

La chauve-souris utilise l'écholocation pour se diriger et chasser ses proies. Elle obtient des informations sur la direction, la distance, la taille et même sur la texture de



l'insecte.

Figure 3.1 : Echolocation de chauves-souris [50].

Les ondes sonores qui sont propagées se répercutent sur les éléments qui les entourent et reviennent vers les chauves-souris qui les perçoivent grâce à leurs oreilles (figure 3.1). Le cerveau analyse le retour des ondes et permet aux chauves-souris d'obtenir une image mentale du paysage environnant. Plus un objet est proche et plus l'onde revient rapidement.

Chaque espèce a son propre cri. Cependant, chez une même espèce, les sons émis vont varier d'un individu à l'autre selon les activités telle que la sortie du gîte ou les différentes étapes d'alimentation : la recherche, la détection, l'approche et l'attaque de la proie. Les cris varient également selon le type d'habitat et d'environnement dans lesquels les chauves-souris se trouvent. Les biologistes utilisent ces cris, que l'on nomme sonagramme, pour identifier les espèces de chauves-souris lors d'inventaire acoustique avec des appareils spécialisés pour enregistrer des ultrasons.

Bien que chaque pulsation ne dure que quelques millièmes de seconde (De 8 à 10 ms), elles ont des fréquences constantes qui sont habituellement dans la région 25kHz et

100 kHz pour la plupart des espèces des chauves-souris. Toutefois, certaines espèces peuvent émettre des fréquences plus élevées allant à 150 KHz. Chaque cri ultrasonique peut durer moyennement 5 à 20 ms. Typiquement les microchiroptères émettent de 10 à 20 cris par seconde. En cas de chasse, le taux d'émission peut être accéléré jusqu'à environ 200 pulsations par seconde quand celles-ci volent à proximité de leurs proies. Ces cris sonores trop courts marquent la capacité étonnante du traitement puissant du signal des chauves-souris. Comme la vitesse du son dans l'air est $v = 340$ m/s, la longueur d'onde λ des cris ultrasoniques avec une fréquence constante f est donné par $\lambda = v/f$. Les longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur que les tailles de leurs proies. L'impulsion émise pourrait être aussi forte que 110 dB, appartenant à la région des ultrasons. L'intensité varie également de la plus forte lors de la recherche de proie et qui diminue en la poursuivant. Les microchiroptères peuvent éviter des obstacles même négligeables.

Les études ont prouvé que les microchiroptères utilisent le délai entre l'émission et la détection de l'écho, la différence de temps entre leurs deux oreilles, et les variations d'intensité des échos afin de construire un scénario tridimensionnel de l'environnement. Elles peuvent détecter la distance d'orientation de la cible, le type de la proie, et même la vitesse de mouvement de la proie telles que les petits insectes. De surcroît, les études ont suggéré que les microchiroptères sont capables de discriminer leurs cibles par la variation de Doppler effect induit par le taux de Wing-flutter de l'insecte cible.

Bien évidemment, quelques chauves-souris ont une bonne vue, et la plupart d'entre elles ont une très grande sensibilité pour l'odorat. En réalité, elles emploient ses sens en combinaison afin de maximiser le coefficient de détection de proie et la navigation minutieuse, particulièrement en obscurité totale. Cependant nous nous intéressons uniquement au comportement d'écholocation.

Le comportement d'écholocation des microchiroptères est associé à une fonction objective à optimiser nous permettant de formuler un nouvel algorithme d'optimisation appelé Algorithme des chauves-souris.

La figure suivante présente le pseudo code de l'algorithme des chauves-souris.

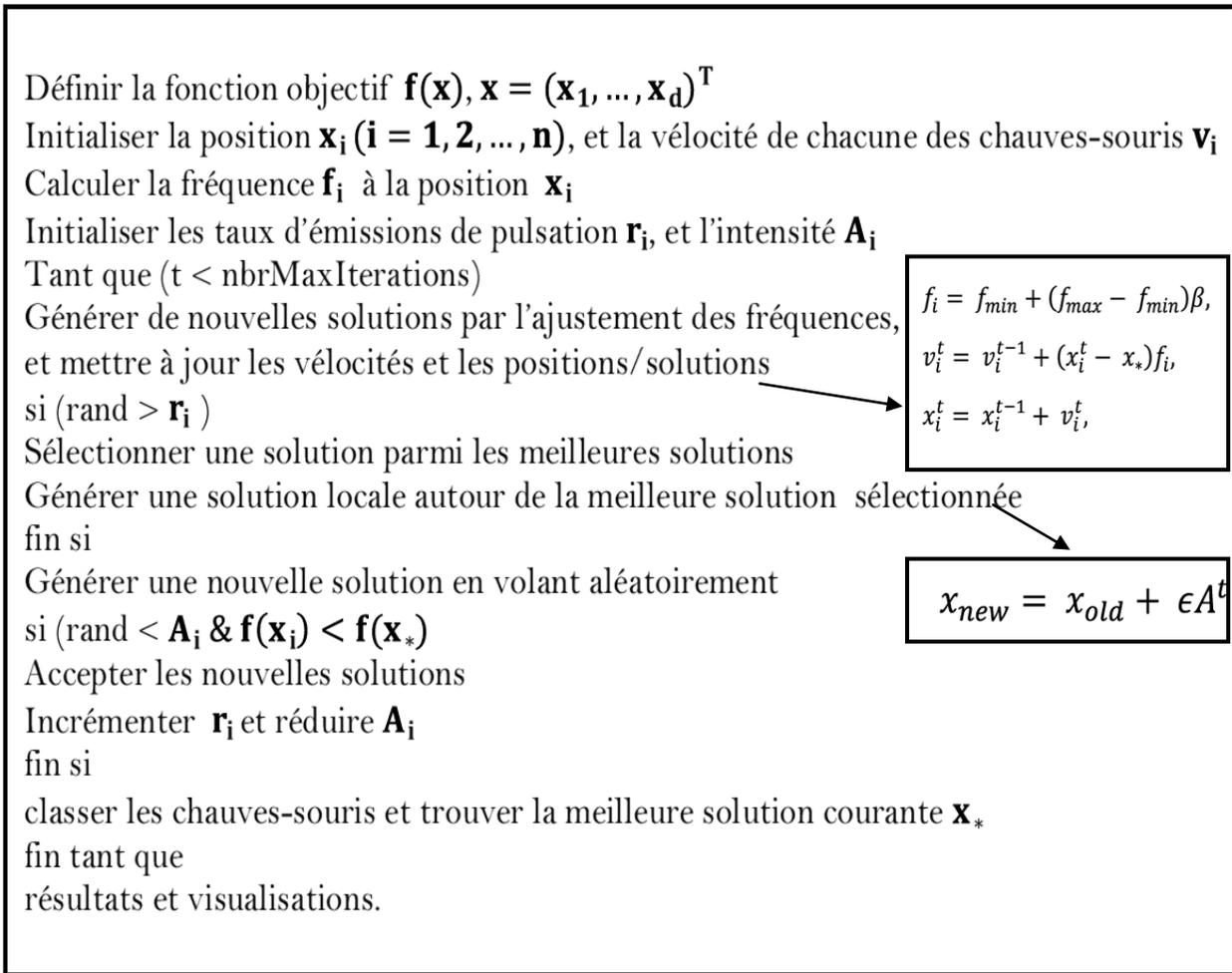


Figure 3.2 : Pseudo code de l'algorithme des chauves-souris

Les mises à jour des vitesses et des positions des chauves-souris ont une certaine similarité avec la procédure standard d'optimisation par essais particulières. À un certain degré, l'algorithme des chauves-souris peut être considéré comme une combinaison d'optimisation par essais particulières et la recherche locale contrôlée par l'intensité et le taux d'émission.

3.3 Domaine d'applications [50]

L'algorithme de chauve-souris standard et ses nombreuses variantes signifient que les applications sont également très diverses. En fait, depuis que l'algorithme a été développé (Yang,2010), les algorithmes de chauve-souris ont été appliqués dans presque tous les domaines de l'optimisation, Classification, Clustering et Data Mining, du traitement d'image, ...etc.

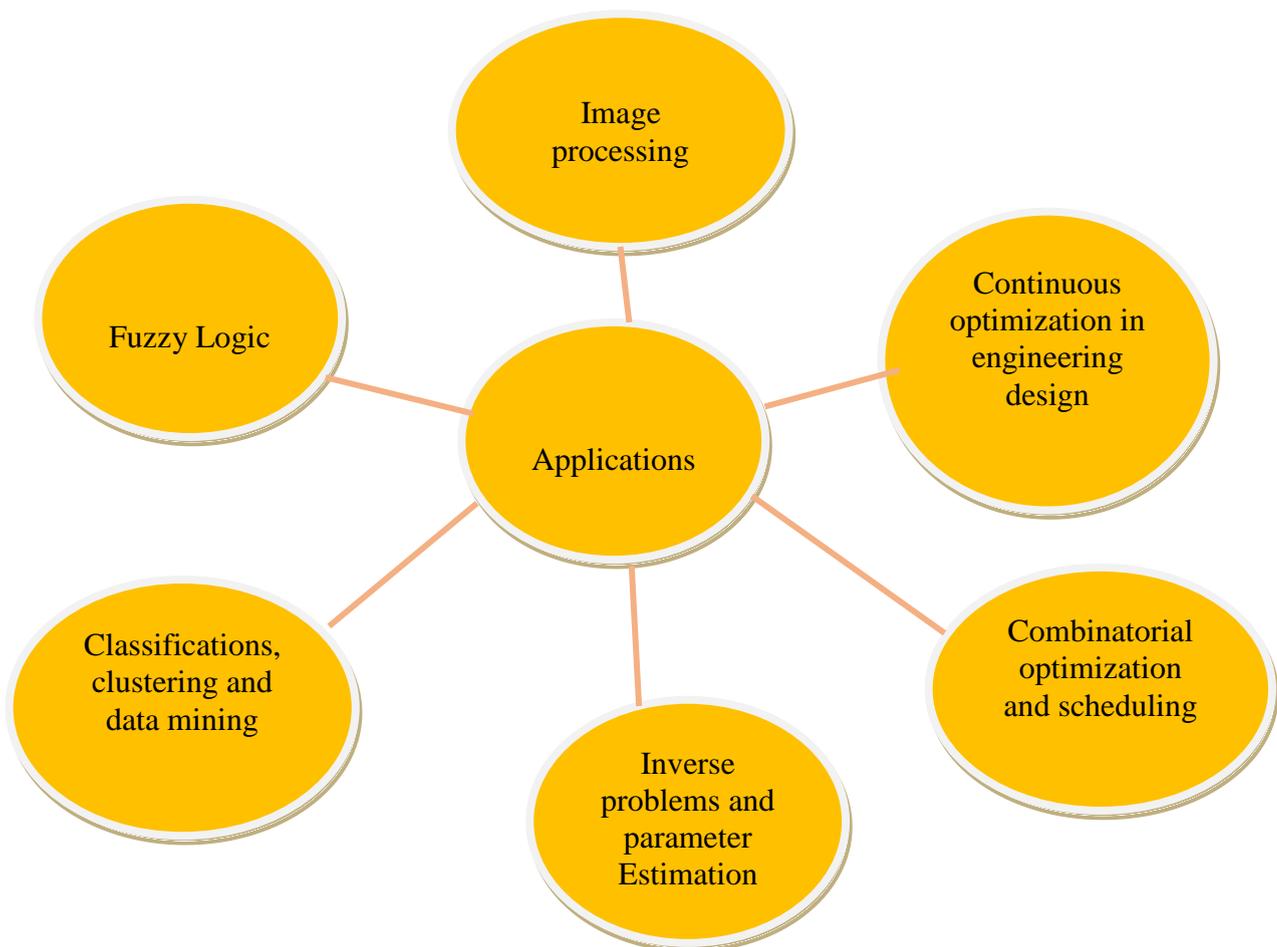


Figure 3.3 : Domaine d'applications d'algorithme de chauves-souris.

3.4 Travaux antérieurs

Les chercheurs dans [52] et [53] tentent d'équilibrer l'énergie des capteurs en considérant quelques informations dans le processus de routage. Alors que les auteurs dans [52] considèrent la localisation, l'énergie de la charge de travail des capteurs comme métriques pour la sélection du prochain capteur qui va router l'information à chaque communication inter capteurs jusqu'à la station de base, les auteurs dans [53] prennent en considération le reste de l'énergie des capteurs comme métrique, la capacité du buffer, le délai de transmission et la qualité de lieu. Ces deux travaux considèrent que ces informations doivent être échangées entre les capteurs afin de procéder aux routages. Par conséquent, cela prend plus de temps et rajoute des consommations inutiles d'énergie ce qui n'a pas été considéré au moment de l'amélioration du processus de routage et l'équilibrage des énergies des capteurs.

Les auteurs dans [54] proposent un protocole de clustering amélioré, prenant en compte la durée de vie et la consommation d'énergie, nommé protocole d'acheminement à efficacité énergétique selon la méthode de Hamilton (HEER). HEER forme des clusters dans la phase d'initialisation du réseau et il relie les membres de chaque cluster avec un chemin Hamilton, construit à l'aide d'un algorithme gourmand, pour la transmission de données. Aucune réformation en cluster n'est nécessaire et les membres sur le chemin tourneront pour devenir ClusterHead.

Les chercheurs dans [55] étudient le problème du regroupement des clusters en considérant à la fois le temps et l'efficacité énergétique. Ils proposent un nouveau protocole de clustering instantané (ICP) qui regroupe les noeuds de capteurs en cluster à un seul saut de manière parallèle. ICP peut instantanément terminer le regroupement en raison de deux conceptions clés. Tout d'abord, pour déterminer les têtes de cluster localement. Les méthodes existantes exigent une longue durée pour élire le CH. Pour renoncer à la consommation de vote, une tête de cluster dans le PIC est localement déterminée par la probabilité pré-assignée et son état actuel. Deuxièmement, minimiser la quantité de transmissions. Les transmissions en parallèle à partir de différentes puissances et l'acquisition (ACK) de plusieurs membres du cluster entraînent une consommation de temps et d'énergie sévère. Au contraire, l'ICP se débarrasse le mécanisme ACK, au lieu de cela, seules les chefs de cluster se disputent la diffusion

pendant une période donnée. Cette période est élaborée pour garantir la connectivité. Des expériences sur un noeud testé et des simulations sur des WSN à grande échelle sont largement conduites pour évaluer l'ICP. Les résultats de performance démontrent que l'ICP surpasse de manière significative les méthodes de clustering existantes en réduisant jusqu'à 55% de consommation de temps et 89% de transmissions pour économiser l'énergie.

Dans le travail de [56] un algorithme de routage EADC-FL (Energy Aware Distributed Clustering) utilisant la logique floue (EADC-FL) est proposé pour le réseau de capteurs sans fils avec une distribution de nœud non uniforme. EADC-FL sélectionne les nœuds les plus appropriés en tant que tête de cluster pour économiser plus d'énergie en phase de transmission de données. Il considère l'énergie des nœuds capteurs comme le paramètre principal pour élire les cluster-head candidats. Ensuite, il prend en considération le degré de nœud et la centralité des nœuds de capteurs en utilisant la logique floue pour identifier les cluster-heads finales. EADC-FL construit les clusters de tailles égales pour équilibrer la consommation d'énergie des membres du cluster et utilise un algorithme de routage basé sur le cluster pour équilibrer la consommation d'énergie entre les chefs de cluster. En outre, l'algorithme proposé effectue le regroupement à la demande au lieu de chaque cycle afin de réduire la dissipation d'énergie du réseau en raison de la surcharge de phases de regroupement consécutives. Les résultats démontrent que EADC-FL diminue de façon significative la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau du réseau avec une distribution de nœud non uniforme.

Les chercheurs dans [57] présentent un protocole de regroupement distribué pour les réseaux de capteurs mobiles sans fil. Une grande majorité de la recherche dans les algorithmes de clustering et de routage pour RCSFs supposent un réseau statique et donc ils sont rendus inefficaces dans les cas de réseaux de capteurs très mobiles, qui sont un aspect abordé ici. MECP est un protocole économe en énergie et adapté à la mobilité et utilise des informations sur le mouvement des noeuds capteurs et de l'énergie résiduelle comme attributs dans la formation du réseau. Il fournit également un mécanisme de tolérance aux pannes pour diminuer la perte de données par paquets en cas de défaillance de la tête de cluster. Chaque noeud prend des décisions sur la

base de deux paramètres, à savoir l'énergie résiduelle et la vitesse relative par rapport à ses voisins. Les coûts de communication intra-cluster sont également pris en compte pour le processus de clustering afin d'augmenter l'efficacité de la consommation.

Les chercheurs dans [58] proposent un schéma de routage d'efficacité énergétique multi-sauts qui considère les facteurs d'énergie résiduelle et de distance pour développer des clusters et CHs optimales pour atteindre l'efficacité et prolonger la durée de vie du réseau. Par MRRCE, les rounds dans lesquels le premier noeud meurt et le dernier noeud meurt sont fortement augmentés. La transmission multi-sauts améliore l'efficacité énergétique des RCSFs en organisant les CH dans un routage hiérarchique multi-sauts, chaque CH peut avoir plusieurs chemins vers la BS, en utilisant l'algorithme de routage MRRCE en considérant la distance et l'énergie résiduelle de CH, ils trouvent toujours le meilleur chemin entre chaque CH à son niveau supérieur et BS, de sorte que cela empêche la perte d'énergie supplémentaire dans la communication réseau. L'auteur a étudié certains algorithmes de routage tels que LEACH, DIRECT, HEED, EHEED et TDTCGE. DIRECT utilise un routage à un seul saut pour envoyer les données à la BS afin que les noeuds qui sont plus près de la BS brûlent leurs batteries rapidement et par conséquent, la durée de vie du réseau sans fil va diminuer. Les algorithmes LEACH, HEED, EHEED utilisent le processus probabiliste pour choisir CH de sorte qu'il ne va pas à la sélection CH absolument optimale.

3.5 Conclusion

L'algorithme de chauves-souris permet de guider la recherche à une solution optimale. Grâce à la simplicité et la souplesse de son principe, il peut être un outil d'optimisation et de conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil qui peut remédier aux limites rencontrées dans les protocoles de routage classiques en matière de prolongement de la durée de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique.

Dans ce chapitre nous avons exploré une technique d'optimisation qui nous a permis de proposer notre protocole de routage basé sur l'heuristique de chauves-souris dont l'objectif principal est le prolongement de la durée de vie des RCSFs ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique. L'architecture, le déroulement, l'implémentation et la simulation de notre technique proposée vont être présentés dans le chapitre qui suit.

Chapitre 4

Contribution

Sommaire

4.1 Introduction

4.2 L'architecture de la contribution proposée

4.3 Déroulement de notre technique

4.4 Le modèle de réseau

4.5 Le modèle d'énergie

4.6 Implémentation de notre technique

4.7 Résultats & Analyses

4.8 Conclusion

4.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre notre contribution proposée, la partie implémentation de ce travail et les simulations effectuées permettent d'évaluer les performances de notre contribution en termes d'efficacité énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil.

4.2 L'architecture de la contribution proposée

Notre technique possède deux phases : une phase de clustering et une phase de communication.

a. Phase de clustering

Les différents CHs choisie par notre technique proposée est évaluée par l'utilisation d'une fonction objective (Équation 4.4). La distance euclidienne est utilisée pour calculer les distances:

$$distance = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (\text{Équation 4.1})$$

x_i et y_i sont les coordonnées de nœud membre i et x_j et y_j sont les coordonnées du CH j .

❖ La fonction f_1 est utilisé pour maximiser le rapport de la distance euclidienne moyenne des nœuds à leurs CH associées, où $d(n_i, CH_{p,k})$ est la distance euclidienne entre le nœud n_i et son $CH_{p,k}$.

$|C_{p,k}|$ est le nombre de nœuds qui appartiennent au cluster C_k de particule p .

$$f_1 = \max_{k=1,2,\dots,K} \left\{ \sum_{\forall n_i \in C_{p,k}} \frac{d(n_i, CH_{p,k})}{|C_{p,k}|} \right\} \quad (\text{Équation 4.2})$$

❖ La fonction f_2 est pour minimiser le rapport de l'énergie totale de tous les nœuds non CH et l'énergie actuelle totale des CHs dans l'itération en cours :

$$f_2 = \frac{\sum_{i=1}^N E(n_i)}{\sum_{k=1}^K E(CH_{p,k})} \quad (\text{Équation 4.3})$$

❖ La fonction objective utilisée par notre technique est :

$$\mathbf{fitness} = f_1 + f_2 \quad (\text{Équation 4.4})$$

b. Phase de communication

Dans la phase de communication, les communications inter cluster et les communications intra cluster auront lieu pour envoyer les données au puits.

4.3 Déroulement de notre technique

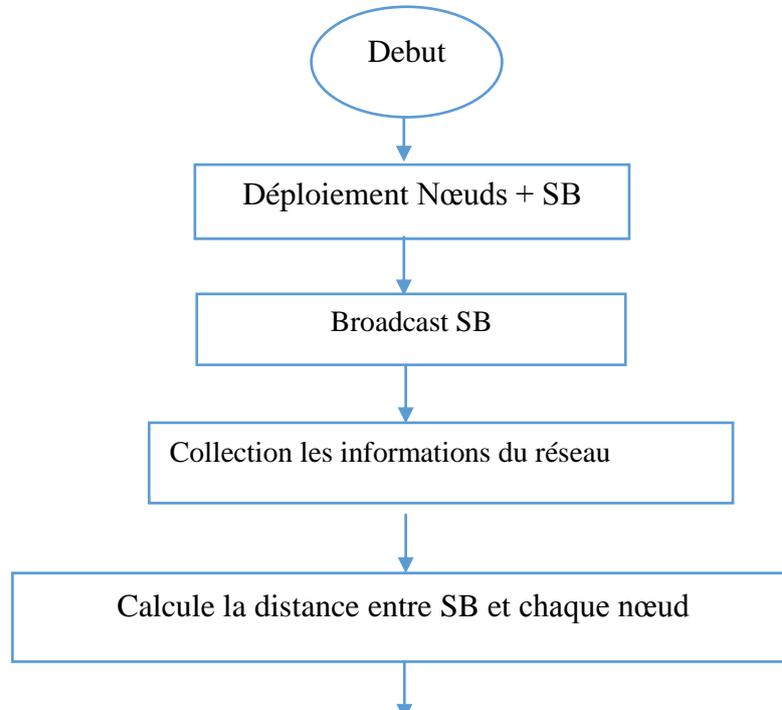


Figure 4.1 : Organigramme de la phase déploiement de notre technique

Initialisation :

N {nombre initial des nœuds} ;

S : matrice représente un nœud avec ses attributs (id, E, d_{sb})

CH : matrice représente CH avec ses attributs (id, N, d_{sb})

$D(i, j)$: matrice de distance entre nœud ($i : 1, \dots, n$) et cluster $j(1, \dots, k)$

$residuel_energy(R)$: matrice d'énergie résiduelle dans chaque cycle

$S_{deads} \leftarrow$ {nombre des nœuds morts}

$S_{live} \leftarrow N - S_{deads}$;

$E_o \leftarrow$ Energie initial de chaque nœud ;

$R \leftarrow 0$; /* nombre de cycle

$Data_{bs} \leftarrow 0$; /* nombre de paquets envoyé au station de base

$Data_{ch} \leftarrow 0$; /* nombre de paquets envoyé au CHs

$M \leftarrow$ pourcentage de nœuds CHs dans le réseau ;

$K \leftarrow 0$; /* nombre de cluster sélectionné

$First_dead_n \leftarrow 0$; /* le premier nœud morts

$Half_dead_n \leftarrow 0$; /* 50% des nœuds morts

Algorithme détaillé de la Phase de déploiement :

Début

Pour i de 1 jusqu'à N faire /* initialisation des nœuds à l'état normale

 Début

$S(i).type \leftarrow 'N'$;

$S(i).E \leftarrow E_o$; /* affectation d'énergie initial pour chaque Noeud

$S(i).d_{bs}$; /*distance entre nœud $S(i)$ et la station de base

 FinPour

Fin

Algorithme détaillé

$R \leftarrow R+1 ;$

Pour i de 1 jusqu'à $(N*M)$ faire /* sélection cluster Head

Début

$temp \leftarrow random(1,N) ;$ /* sélectionner un nombre aléatoire

Si $(S(temp).type \neq 'C')$ Alors

$S(temp).type \leftarrow 'C' ;$

$k \leftarrow k+1 ;$ /* incrémenter le nombre de cluster

$CH(k).id \leftarrow temp ;$ /*id du cluster head

$CH(k).dbs \leftarrow S(temp).dbs ;$

$CH(k).N \leftarrow 0 ;$ /*nombre des nœuds membre de cluster

FinSi

FinPour

Pour j de 1 jusqu'à K faire /* calculer la distance entre chaque CHs et tous les nœuds

Début

Pour i de 1 jusqu'à N faire

Début

Si $(S(i).type == 'N')$ Alors

$D(i,j) \leftarrow$ distance entre $S(CH(j).id)$ et le nœud $S(i) ;$ /*distance entre le nœud $S(i)$
et cluster j

FinSi

FinPour

FinPour

Pour i de 1 jusqu'à N faire / cluster formation et énergie dissipé par CHs et Non-CH*

Début

Si (S(i).type== 'N') Alors

Pour j de 1 jusqu'à K faire

Début

Si (D(ij) est minimum) alors

Assigner le nœud Si au cluster j

CH(j).N ← CH(j).N +1 ; / incrémenter le nombre des nœuds dans cluster j*

S(i).E ← S(i).E – Energie consommé lors l'envoi de données au CH ;

Data_{ch} ← Data_{ch} +1 ; / incrémenter le nombre de données envoyées au CH*

*S(CH(j).id).E ← S(CH(j).id).E – Energie consommé par CH(j) lors la réception
← et l'agrégation de donnée de nœud S(i) ;*

FinSI

FinPour

FinSi

Si (S(i).type== 'C') Alors

S(i).E ← S(i).E – Energie consommé lors l'envoi de données à SB par CH ;

Data_{bs} ← Data_{bs} +1 ; / incrémenter le nombre de données envoyées à SB*

FinSi ←

FinPour

« « « calcul d'énergie résiduelle de premier cycle » » »

Sum ← 0 ;

Pour j de 1 jusqu'à N faire

Début

Sum ← Sum+S(i)E;

FinPour

residuel_energy(R) ← Sum ;

- $f(x^*)$: évaluer la fonction fitness (Equation 4.4)

Tant que ($t <$ nombre maximale d'itérations)

- Générer des nouvelles solutions par ajustement des fréquences et mise à jour des vitesses :

Pour chaque nœud faire :

- Calculer les distances entre le nœud et les CHs (Equation 4.1)
- Assigner le nœud au CH avec une distance minimale
- Calculer $f(C)$: évaluer la fitness (Equation 4.4)

Fin Pour

- Mettre à jour solution (x_{ti})

SI ($f(x_{ti}) < f(x^*)$) *alors*

- Accepter la solution

Fin de tant que

- $x^* \leftarrow x_{ti}$;

❖ Phase de communication :

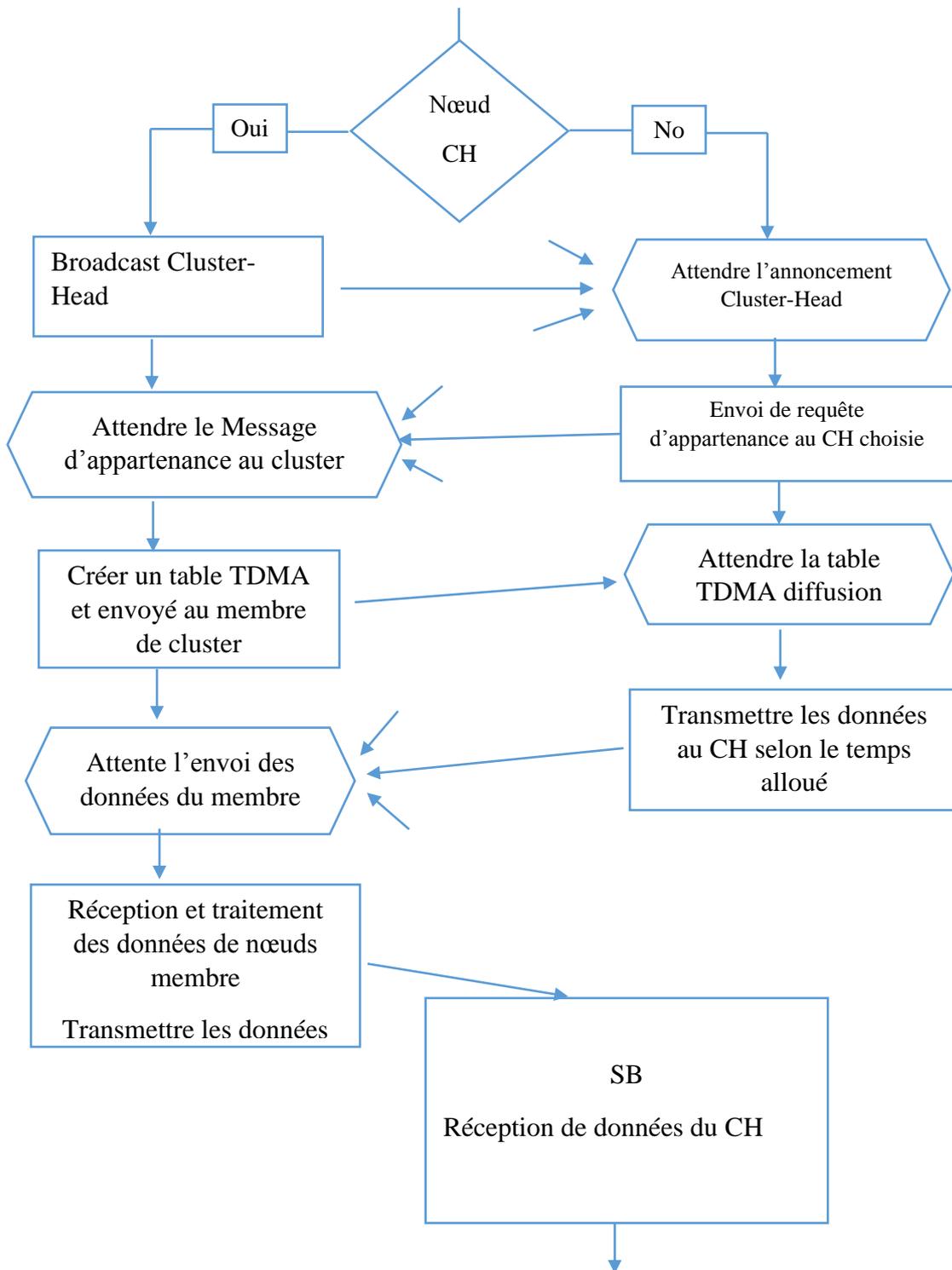


Figure 4.2 : Organigramme de phase de communication

4.4 Le modèle de réseau

Dans notre étude, nous considérons un réseau de capteurs à architecture clustérisée constituée de N nœuds homogènes distribués aléatoirement dans un espace de 2-dimensions ($M*N$), et une station de base fixe située dans l'espace de déploiement des nœuds avec les coordonnées $(X_{\text{sink}}, Y_{\text{sink}})$.

- ❖ L'énergie initiale est uniforme pour tous les nœuds et il est incapable de les rechargés ;
- ❖ Les nœuds capteurs sont fixes après déploiement (déploiement statique) et ils sont repérés par les coordonnées (x,y) , et ont toujours des données (L bit/Round/nœud) à envoyer à la station de base ;
- ❖ Le rayon de transmission est supposé fixe et semblable sur tous les nœuds du réseau ;
- ❖ L'énergie suffisante pour transmettre ou recevoir d'un message est la même ;
- ❖ Les nœuds meurent seulement quand ils n'ont plus d'énergie ;
- ❖ Environ 10% de ces nœuds assument la tâche de Cluster Head ;
- ❖ Les nœuds voisins sont groupés dans des clusters, chaque cluster est géré par un cluster-head (CH) nommé également chef de groupe, les paquets des données sont transmis directement par les nœuds à leur CH, tous les nœuds peuvent fonctionner en mode CH de cluster ou en mode membre de cluster ;

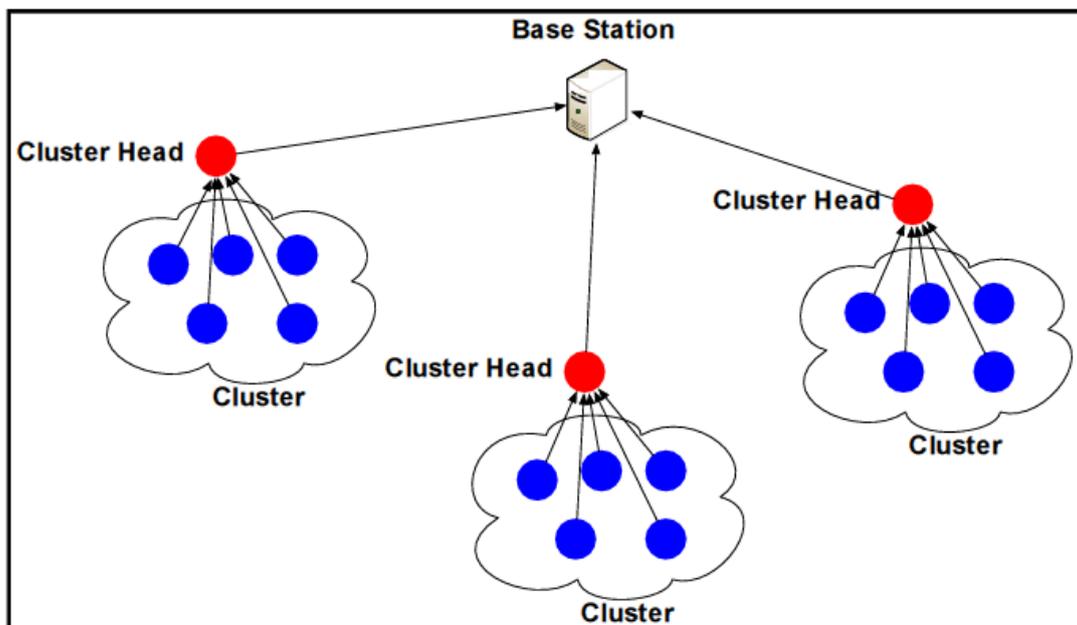


Figure 4.3 : Modèle de réseau

4.5 Le modèle d'énergie

Le modèle choisi correspond à un modèle radio simple cité dans plusieurs articles [29,59, 60], les équations utilisées pour calculer les coûts de transmission et les coûts de réception pour un message de L bits et une distance d sont indiqués ci-dessous :

- ❖ Pour transmettre un message de L bits sur une distance de d mètres, l'émetteur consomme:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{mp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (\text{Équation 4.5})$$

E_{elec} : L'énergie suffisante pour transmettre ou recevoir un seul bit.

ϵ_{fs} : Facteur de l'amplification correspond au modèle « free space channel ».

ϵ_{mp} : Facteur de l'amplification correspond au modèle « multipath fading channel ».

E_{da} : L'énergie d'agrégation de donnée.

L: La taille d'un message.

d_0 : La distance limite pour laquelle les facteurs d'amplification changent de valeur.

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (\text{Équation 4.6})$$

d: La distance entre l'émetteur et le récepteur.

- ❖ Pour recevoir un message de L bits, le récepteur consomme:

$$E_{RX}(L) = L * E_{elec} \quad (\text{Équation 4.7})$$

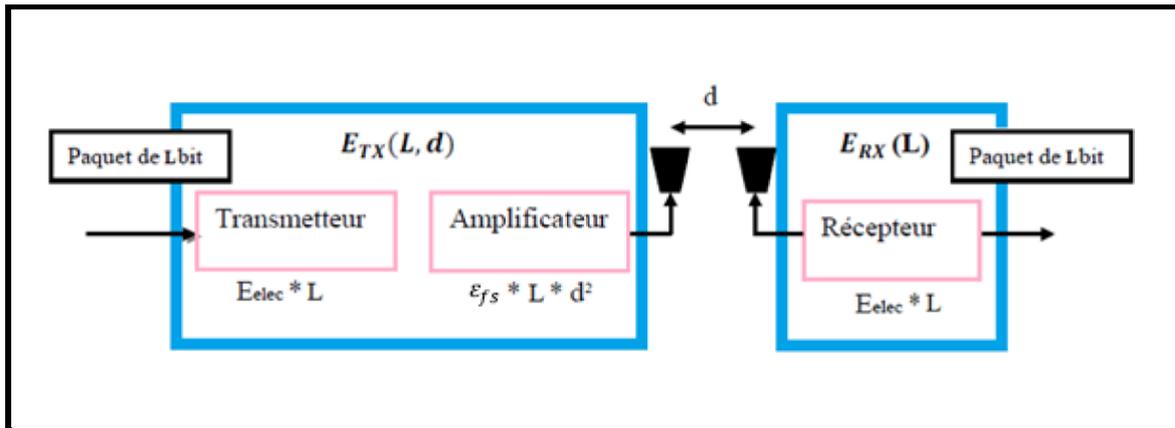


Figure 4.4 : Le modèle de dissipation de l'énergie.

4.6 Implémentation de notre technique

4.6.1 Le Choix de langage de programmation

MATLAB (Matrix Laboratory) est un langage de programmation de quatrième génération, développé à l'origine pour le calcul matriciel par la société The MathWorks, il est utilisé à des fins de calcul numérique et visualisation graphique. MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Il peut s'utiliser seul ou bien avec des boîtes à outils additionnelles conçues pour répondre à de nombreux besoins spécifiques aux ingénieurs et aux scientifiques.

Les caractéristiques de la machine utilisée dans la simulation sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1: Caractéristiques matérielles

| Hardware | Caractéristiques |
|-------------------------|---|
| Processeur | Intel(R) Core(TM) i5-5200U (4CPU) @ 2.20GHz, 2.20GHz. |
| Mémoire (RAM) | 8.00 Go. |
| Système d'exploitations | Microsoft Windows 10 Enterprise 2016 LTSC 64-bit . |

4.6.2 Description de l'interface de simulation

Le simulateur se constitue de trois parties principales : partie de paramètres de simulation à gauche, partie de zone de simulation au milieu et la partie de résultats de simulation à droite

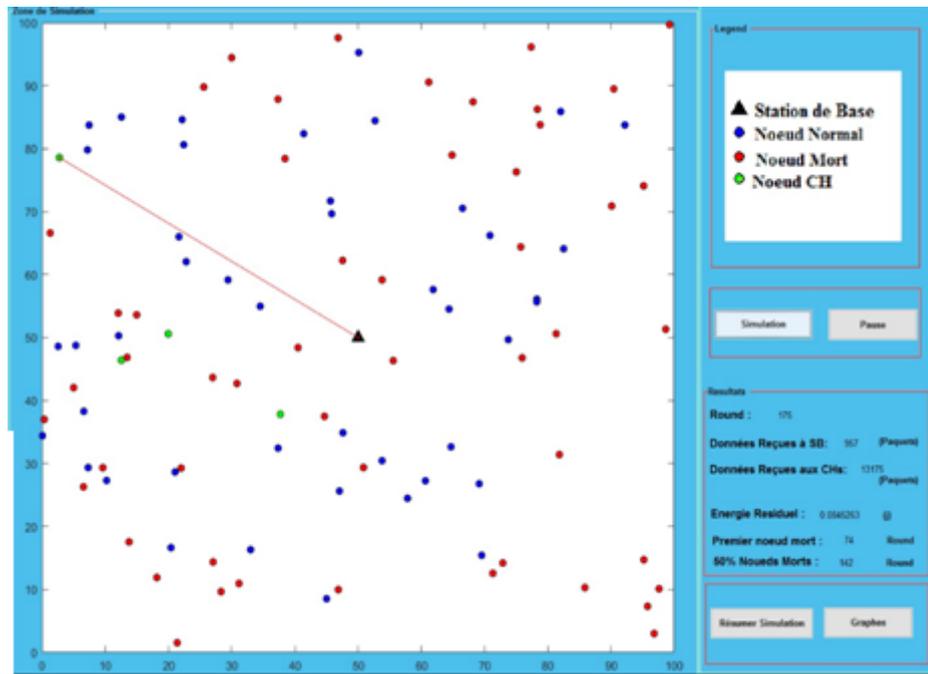


Figure 4.5 : Interface de notre application.

a. Partie de paramètres de simulation :

Cette interface nous permet de saisir tous les paramètres de simulation : les délimitations de la zone de simulation et la position de la station de base. Après, on entre le nombre des nœuds à distribuer dans la zone, les paramètres de modèle d'énergies choisis dans cet étude (l'énergie initiale E_0 , E_{elec} , E_{fs} , E_{mp} , E_{da}),

b. Zone de simulation

Cette zone contient trois parties :

- ❖ La première partie représente la zone de simulation.

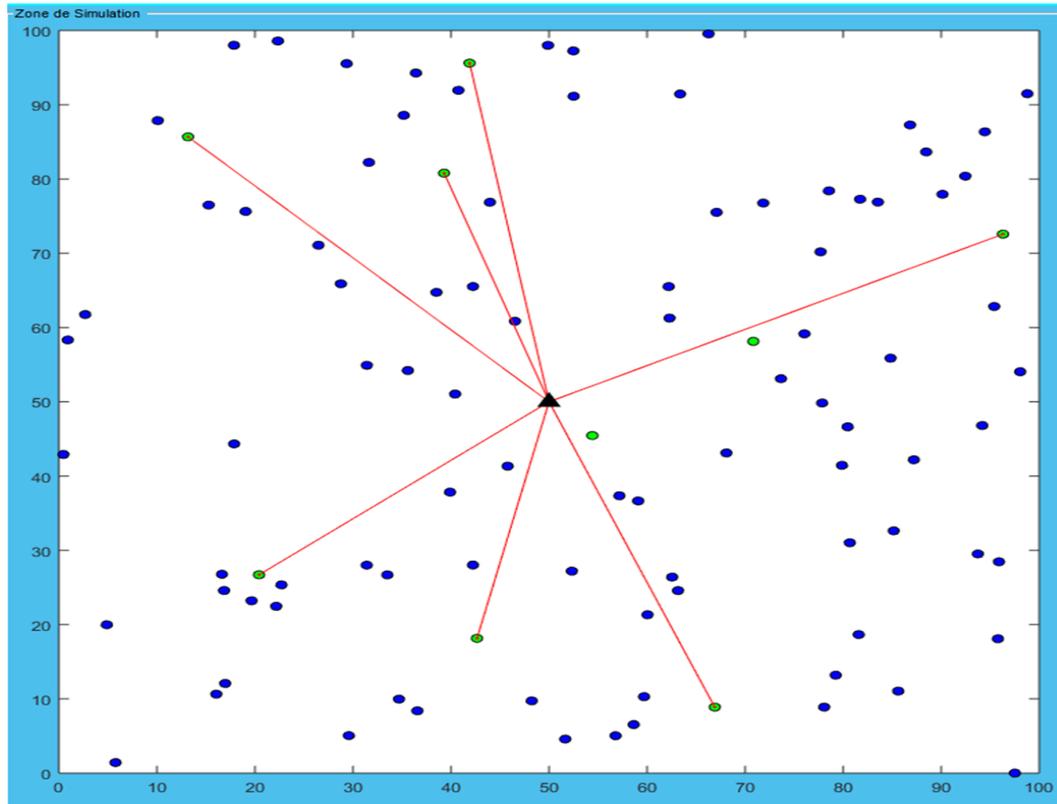


Figure 4.6: Zone de simulation.

La deuxième partie représente la légende qui représente les composantes de la première partie : la BS en noir, Nœud CH en vert, Nœud Normal en Blue et le Nœud Mort en rouge.

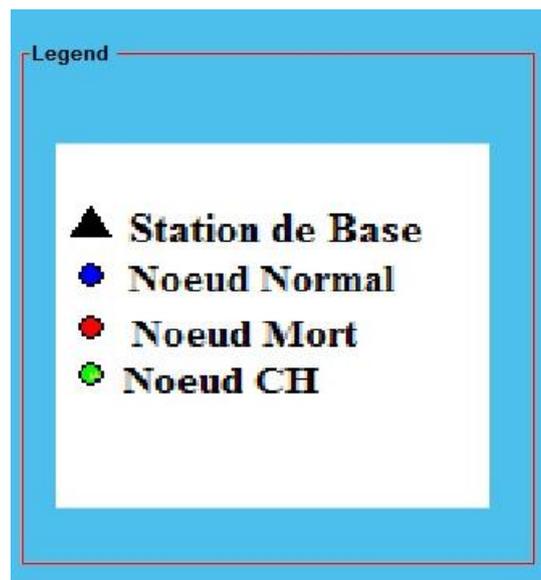


Figure 4.7: Légende.

- ❖ La troisième partie se compose d'un bouton "Simulation" pour lancer la simulation et un bouton "Pause " pour mettre en pause ou reprend la simulation.



Figure 4.8: Simulation.

c. Partie de résultats de simulation

Elle se compose de :

- ❖ Les résultats courants de la simulation : l'itération courante (Round), premier nœud mort, 50 % des nœuds morts, dernier nœud mort, l'énergie consommée.
- ❖ Un bouton "Résumer Simulation" qui sert à résumer les résultats sous forme d'un fichier excel.
- ❖ Un bouton "Graphes" qui sert à résumer les résultats sous forme des graphes.



Figure 4.9: Résultats de simulation.

4.7 Résultats & Analyse

4.7.1 Résultats

Pour évaluer les performances de notre technique, nous avons procédé à la comparer avec protocole de routage LEACH-C.

Le tableau présenté ci-dessous résume les résultats de plusieurs simulations (20 fois) effectuée sur notre technique :

Tableau 4.2: Résultats de simulations.

| Notre technique | Premier nœud mort (itération) | 50 % de nœuds Morts (itération) | Dernier Nœud morts (itération) |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Simulation 1 | 88 | 137 | 219 |
| Simulation 2 | 75 | 133 | 230 |
| Simulation 3 | 77 | 141 | 241 |
| Simulation 4 | 68 | 148 | 217 |
| Simulation 5 | 63 | 133 | 237 |
| Simulation 6 | 72 | 137 | 215 |
| Simulation 7 | 80 | 137 | 244 |
| Simulation 8 | 73 | 141 | 202 |
| Simulation 9 | 95 | 142 | 246 |
| Simulation 10 | 76 | 140 | 230 |
| Simulation 11 | 74 | 139 | 208 |
| Simulation 12 | 87 | 141 | 200 |
| Simulation 13 | 65 | 137 | 218 |
| Simulation 14 | 82 | 140 | 240 |
| Simulation 15 | 83 | 145 | 239 |
| Simulation 16 | 74 | 140 | 221 |

| | | | |
|-----------------|-------------|--------------|---------------|
| Simulation 17 | 75 | 137 | 239 |
| Simulation 18 | 84 | 139 | 216 |
| Simulation 19 | 63 | 139 | 207 |
| Simulation 20 | 74 | 142 | 254 |
| La Moyen | 76,4 | 139,4 | 226,15 |

a) **Durée de vie de réseau**

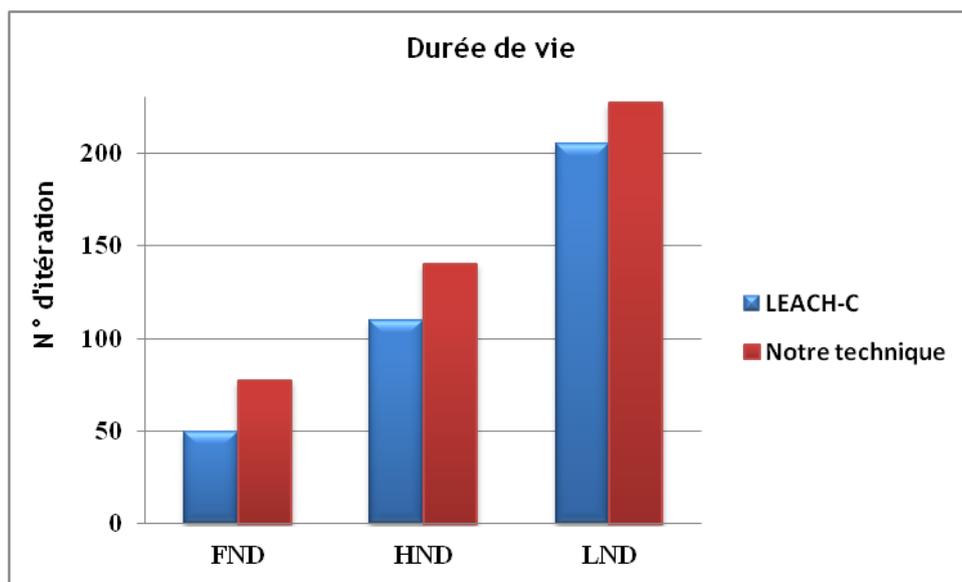


Figure 4.10 : Durée de vie du réseau.

b) **Énergie résiduelle**

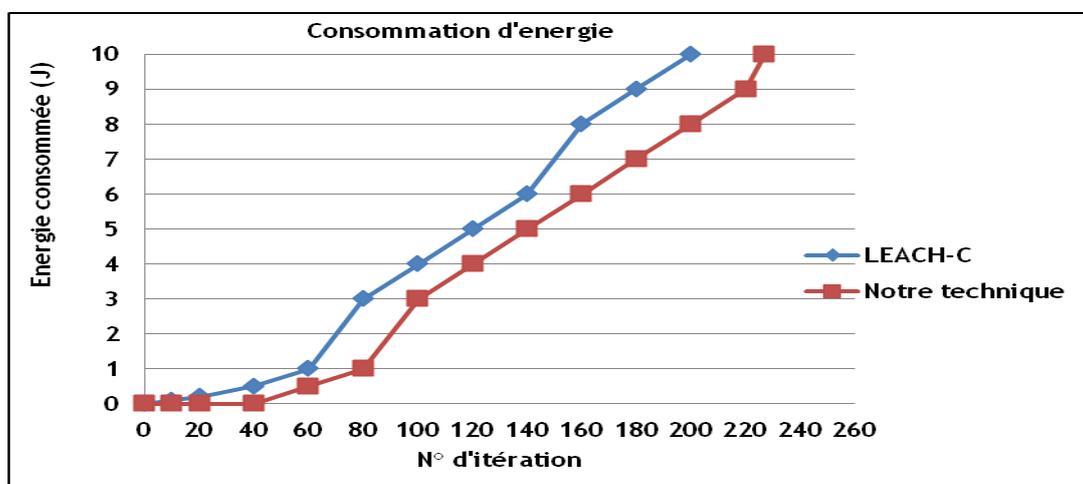


Figure 4.11 : Energie consommée Vs nombre d'itérations.

4.7.2 Analyse des résultats

Nous déduisons d'après les résultats de simulation que notre technique surpasse le protocole LEACH-C en termes de durée de vie et en termes de consommation d'énergie dans chaque itération.

4.8 Conclusion

Dans ce travail une nouvelle technique a été suggérée. Les résultats de la simulation montrent que notre technique prolonge la durée de vie de réseau et minimiser la consommation d'énergie par rapport à LEACH-C.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Le succès des réseaux de capteurs sans fil est fondé sur la simplicité des nœuds capteurs (faible puissance de calcul, petite batterie, antenne radio à portée limitée...). Cependant, lorsque ces capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur de grands espaces, c'est à-dire lorsqu'il est difficile voire impossible de remplacer les batteries des nœuds quand elles arrivent à épuisement alors la consommation d'énergie devient un problème fondamental. De ce fait, la durée de vie limitée des nœuds va avoir un impact sur la durée de vie du réseau tout entier. Par la suite, elle aura des conséquences négatives sur la connectivité et la couverture du réseau.

En effet, plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature afin d'améliorer les performances des RCSFs et de répondre aux besoins des applications considérées. Dans ce projet nous nous sommes intéressés un type de routage bio-inspiré, et plus particulièrement aux algorithmes chauves-souris inspirés du comportement d'écholocation de chauves-souris et qui constituent une famille des méta-heuristiques d'optimisation. Visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace.

Pour cela, nous avons essayé à travers ce mémoire de faire le tour sur ce phénomène qui touche les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons commencé de présenter les généralités qui entourent le domaine des RCSFs, puis nous avons focalisé notre étude sur les principaux protocoles de routages et leurs différentes caractéristiques, qui présentent les différentes solutions de routage existantes selon une classification par rapport à la structure du réseau utilisée, et les types de protocoles. Nous avons aussi présenté le comportement d'écholocation de chauves-souris et quelques travaux antérieurs concernant l'économie de l'énergie dans les RCSFs.

Nous avons implémenté une nouvelle version améliorée de LEACH-C en utilisant l'algorithme de chauves-souris, nous avons découvert un champ de recherche très intéressant qui touche presque tous les domaines d'application. Cela nous a permis de nous initier à la recherche, et nous espérons avoir apporté une contribution, aussi petite qu'elle soit, à ce domaine qui est en pleine évolution.

Afin de valider les améliorations apportées par notre technique proposée en terme de prolongement de durée de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation

Conclusion générale et perspectives

énergétique, nous avons simulé le fonctionnement de notre algorithme avec le simulateur créé en langage MATLAB et comparé les résultats fournis avec ceux du protocole LEACH-C.

L'implémentation de cet algorithme a montré son efficacité, où il garantit l'acheminement correct des données dans la plupart des tests tout en préservant la durée de vie du réseau pour des périodes assez importantes et qui surpasse le protocole LEACH-C.

Perspectives :

- ❖ Ajouter d'autres paramètres dans la fonction objective.
- ❖ Ajouter d'autres métriques d'évaluation.
- ❖ Comparer le protocole implémenté par d'autres protocoles récemment réalisés pour voir son efficacité dans le domaine économie de l'énergie dans RCSFs. Simuler notre protocole avec d'autres simulateurs dédié aux réseaux de capteurs sans fil tel que NS2 ;
- ❖ L'implémentation de notre technique sur des capteurs (tels que : Tmote Sky, MICA, Imote, ...) qui va nous permettre d'évaluer les performances de notre contribution dans le monde réel ;

Bibliographie

- [1]: Sabrina Naimi, Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage, Thèse de Doctorat, Université paris-sud, 22 juillet 2015.
- [2]: Amina Boudjaadar, Plateforme basée Agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Magistère, Université de Skikda, 2009/2010.
- [3]: Mandicou BA, Vers une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc : cas des réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 21 Mai 2014.
- [4]: Malick GAYE, Etat de l'art sur les WSN (Wireless Sensor Network), Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Juin 2014.
- [5]: Datasheet tmote ky:<http://www.eecs.harvard.edu/konrad/projects/shimmer/references/tmote-skydatasheet.pdf>.
- [6]: W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks, in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, Oct 2002.
- [7]: Diery Ngom, Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau, Université de haute alsace, Université Cheikh DIOP de Dakar, 17 Mai 2016.
- [8]: Ahmad Alkhatib, A Review of Wireless Sensor Networks Applications, The University of Wales, Newport, UK, Conference on Innovations in Computing and Engineering Machinery, Août 2011.
- [9]: <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/SensorNetworkMuseum>.
- [10]: Cristian Duran-Faundez, Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie, Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 23 juin 2009.

- [11]: Crossbow Technology, MTS/MDA Sensor Board User's Manual, Revision A, June 2007:
http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Equipamiento/Wireless/MTS-MDA_Series_Users_Manual.pdf.
- [12]: Messaoud Belloula, La géolocalisation dans les réseaux de capteurs sans fil Etude de cas : Utilisation en agriculture, Thèse de Magistère, Université Hadj Lakhder-Batna,2012.
- [13]: Carlo Alberto Boano, Nicolas Tsiftes, Thiemo Voigt, The Impact of Temperature on Outdoor Industrial Sensor Applications IEEE Transactions on Industrial Informatics , Volume: 6, Issue: 3, Aug. 2010.
- [14]: C. Mettu, Telosb, Datasheet: <https://fr.scribd.com/doc/68138250/Telosb-Datasheet-t>
- [15]: Abdelmalek BOUDRIES, Maintien de la Connectivité dans les Réseaux Ad hoc sans fil, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif 1,2014.
- [16]: LABRAOUI Nabila, La sécurité dans les réseaux sans fil ad hoc, Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen,2012.
- [17]: Nisrine GHADBAN, Fusion de l'information dans les réseaux de capteurs : application à la surveillance de phénomènes physiques, Thèse de Doctorat, Université de technologie de Troyes, 14 décembre 2015.
- [18]: KECHAR Bouabdellah, Problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 13 / 07 / 2010.
- [19]: Jannatul Ferdous , Rabia Salihi, Routing: Internet Routing Protocols and Algorithms, September 2015.
- [20]: Echoukairi Hassan, Bourgba Khalid, Ouzzif Mohammed, A Survey on Flat Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, September 2015.
- [21]: Sanjolly JainR, Amit Grover, Routing Techniques in Wireless Sensor Networks, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 94 – No 6, Mai 2014.

- [22]: N Mohana Priya, G Brindha, A Survey on Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, International Conference on Computer Applications ,2016.
- [23]: Kushavaha, Roshani , Umesh Kumar Chourasiya, Mahesh , Gour, Mahesh, A Study of Power and Energy Aware Routing Technologies in Wireless Sensor Network. International Journal of Computer Science and Information Technologies,2014.
- [24]: Jigish Rana, Sangeeta Vhatkar, Mohommad Atique, Comparative Study of PEGASIS and PDCH Protocols in Wireless Sensor Network, International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology, 2015.
- [25]: Rajesh Chaudhary, Sonia Vatta, A tutorial of routing protocols in wireless sensor networks, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.6, June 2014.
- [26]: Kulik. J, Heinzelman,W Balakrishnan.H ,Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks ,Wireless Networks, Volume 8, Issue 2–3, pp 169–185, Mars 2002.
- [27]: MUHAMMAD asif, Shafiullah khan, Rashid ahmad, Muhammad sohail, Dhananjay singh, Quality of Service of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, 2017.
- [28]: Samina Ehsan, Bechir Hamdaoui, A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks, IEEE communications surveys & tutorials, vol. 14, no. 2, 2012.
- [29]: W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H.balakrishnan, Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, International Conference on Systems Science, vol. 8, pp. 8020, 2000.
- [30]: Lindsey Stephanie, S. Raghavendra, Cauligi, PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems, 2001.
- [31]: F Liu, Huazhong, International Conference on Computer Science and Network Technology, Agricultural University Wuhan, China ,2011.

- [32]: Khaled Bouchakour, Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil : Protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy), Thèse de Magister, Ecole Nationale Supérieure de l'Informatique (ESI),2012.
- [33]: Cedric RAMASSAMY, Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, 23 Novembre 2012.
- [34]: Arati Manjeshwar, Dharma P, A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, In Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium, IPDPS '01, pages 189, Washington, DC, USA, 2001.
- [35]: Mehdi Bouallegue, Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Université Bretagne Loire, 31/03/2016.
- [36]: Lalita Yadav, Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy in Wireless Sensor Network (LEACH), International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5 (3), 2014.
- [37]: Ravneet KAUR, Deepika SHARMA and Navdeep KAUR, Comparative Analysis of LEACH and Its Descendant Protocols in Wireless Sensor Network, International Journal of P2P Network Trends and Technology, Vol. 3, Issue 1, pp. 51-55, 2013.
- [38]: Abdul Halim ZAIM, An Integrative Comparison of Energy Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Network, Scientific Research of Wireless Sensor Network, Vol. 4, pp. 65-67, 2012.
- [39]: Parminder KAUR¹, Mrs. Mamta KATIYAR, The Energy-Efficient Hierarchical Routing Protocols for WSN: A Review, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Vol. 2, Issue 11, November 2012.
- [40]: J. Gnanambigai, Dr. N. Rengarajan, K. Anbukkarasi, LEACH and Its Descendant Protocols: A Survey, International Journal of Communication and Computer Technologies, Vol. 01, No.3, Issue 02, September 2012.
- [41]: Tripathi, Meenakshi, Gaur, Manoj, Laxmi, Vijay and Babu, Energy efficient LEACH-C

protocol for Wireless Sensor Network, 2013.

- [42]: M.Ahmad Jan and M.Khan, A Survey of Cluster-based Hierarchical Routing Protocols, International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC),vol.3, no.2, pp. 138-143, April 2013.
- [43]: R.Ralhan, S.Singhcoarich, Review on various LEACH variants, journal engineering of sciences, vol. 1,pp. 73-78 ,India ,2016.
- [44]: V.Ioscri, G.morabito and S.Marano, A Two-Levels Hierarchy for low-Energy Adaptive clustering hierarchy (TL-LEACH), vehicular technology conference, Université de calabria italy ,2005.
- [45]: J.Brandao, A.silvarego , MH-LEACH :A Distributed for multi-hop communication in Wireless sensor Network , the thirteenth international conference on Networks, State University of Cearà (UECE) Fortaleza Brazil, 2014.
- [46]: A.Ahmed, Cluster Heard selection Algorithm for Wireless sensor Network, conference , National University of Sciences and Technology (NUST) Karachi Pakistan,2013.
- [47]: A.yektaparast , F.nabavi, A.saramast, An Improvement on LEACH protocol (cell-LEACH) ,Islamic Azad University, Dezful Branch, Iran, 2012.
- [48]: R.Ralhan, S.Singhcoarich, Review on various LEACH variants journal, engineering sciences , Deptt. Of CSE GNDU Amritsar India ,2014.
- [49]: X.S. Yang, A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin, 284, Springer, 65-74 ,2010.
- [50]: S. Induja, V.P. Eswaramurthy, Bat Algorithm: An Overview and its Applications, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 5, Issue 1, January 2016.

- [51]: Altringham, McOwat, and Hammond Bats: biology and behavior, Oxford University Press, USA, 1998.
- [52]: Singh, A., S., Awadhesh, K. (2015), “Mobility and Energy Conscious Clustering Protocol for Wireless Networks”, In: Suresh,C.(Ed.) Advances in Intelligent Systems and Computing :Proceedings of the International Congress on Information and Communication Technology . Springer Singapore, pp 365-374.
- [53]: Srikanth, J. and Prasanta, K. (2016) ,“ A grid based clustering and routing algorithm for solving hot spot problem in wireless sensor networks” Journal of wireless Networks. Vol 22 No 6, pp 1901-1916.
- [54]: Yi, D. and Yang, H. (2016), “HEER- A Delay-aware and Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks” .Journal of Computer Networks. Vol. 104, pp 155-173.
- [55]: Linghe, k., Qiao, X., Xue, L., Xiao, L., Xiao, G., Guihai, C. and Min-You, Wu. (2016), “ICP: Instantaneous clustering protocol for wireless sensor networks”, Journal of Computer Networks, Vol .101, pp. 144 –157.
- [56]: Nooshin, N., Zurina, M., Shamala, S. and Mohamad, A. (2015), “An Energy Aware Distributed Clustering Algorithm Using Fuzzy Logic for Wireless Sensor Networks with Non-uniform Node Distribution”. International journal of wireless personal communications. Vol. 84 No.1, pp 395-419.
- [57]: Singh, A., S., Awadhesh, K. (2015), “Mobility and Energy Conscious Clustering Protocol for Wireless Networks”, In: Suresh,C.(Ed.) Advances in Intelligent Systems and Computing :Proceedings of the International Congress on Information and Communication Technology . Springer Singapore, pp 365-374.
- [58]: Elham, R., Amir , A. (2015) , “ Multi-hop Routing Algorithm Using Steiner Points for Reducing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks”. Journal of Wireless Personal Communications. Vol. 86 No. 3, pp. 1557-1570.
- [59]: Marwa Sharawi, E. Emary, Imane Aly Saroit, Hesham El-Mahdy, Bat Swarm Algorithm

for Wireless Sensor Networks Lifetime Optimization, International Journal of Science and Research, Volume 3 Issue 5, Mai 2014.

[60]: Manshahia Mukhdeep, Dave Mayank and Singh S, Improved Bat Algorithm Based Energy Efficient Congestion Control Scheme for Wireless Sensor Networks,2016.