

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 : Système intelligent

Thème

**Proposition d'un protocole de routage efficace en énergie
basée sur une approche inspirée de la nature dans
un réseau de capteur sans fil**

Préparés par

BARMATI Mohammed Elsadiq et YUCEFI Hanane

Encadré par

Mr. Mohammed DEMRI

Année Universitaire : **2017/2018**

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) représentent une technologie émergente qui vise à offrir des solutions et des capacités innovantes. Leur utilisation continue d'être augmentée dans de nombreux domaines comme la santé, l'environnement, le champ de bataille, etc. Cependant, les ressources limitées des nœuds capteurs sont une contrainte importante, principalement en termes d'autonomie énergétique. Pour cette raison, l'un des principaux problèmes dans les réseaux de capteurs est de développer un protocole de routage économe en énergie pour augmenter la durée de vie du réseau. Le clustering est l'une des techniques largement utilisées pour exploiter efficacement l'énergie du réseau. Il est indiqué dans la littérature que la conception d'un algorithme de clustering dynamique est un problème NP-complet. Au cours des dernières années, de nombreuses approches méta-heuristiques ont été proposées à ce problème. Algorithme de Recherche de Coucou (CSA) est l'un des nouveaux algorithmes méta-heuristiques inspirés de la nature pour résoudre de nombreux problèmes d'optimisation. Dans ce mémoire nous proposons ECSBCP (Enhanced Cuckoo Search-Based Clustering Protocol) comme un nouveau protocole de routage à base de clustering en utilisant la méthode de recherche Coucou. L'analyse des performances et les résultats obtenus montrent que notre protocole proposé fonctionne bien en termes de consommation d'énergie, durée de vie du réseau et quantité de données envoyées à la station de base (BS) par rapport au célèbre protocole LEACH.

Mots clés: Algorithme de Recherche Coucou; Efficacité énergétique; Clustering ; Réseaux de capteurs sans fil ; Protocole de routage ; Durée de vie du réseau.

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) represent an emerging technology, which aims to offer innovative solutions and capabilities. Their use is continuing to be increased in many areas like health, environment, battlefield etc. However, the limited resources of the sensor nodes is an important constraint, mainly in terms of energy autonomy. For this reason, one of the major issues in sensor networks is developing an energy-efficient routing protocol to improve the network lifetime. Clustering is one of the techniques widely used to exploit the energy of the network efficiently. It is pointed out in the literature that designing a dynamic clustering algorithm is a NP-hard problem. In recent years, many meta-heuristic approaches had been proposed for this purpose. Cuckoo Search Algorithm (CSA) is one of the new nature-inspired meta-heuristic algorithms for solving many optimization problems. In this work, we propose ECSBCP (Enhanced Cuckoo Search-Based Clustering Protocol) as a new clustering-based routing protocol using Cuckoo Search Algorithm. Performance analysis and the obtained results show that our proposed protocol performs well in terms of energy consumption, network lifetime and the amount of data sent to the Base Station (BS), compared to the well-known LEACH protocol.

Keywords: Cuckoo search Algorithm; Energy efficiency; Clustering; Wireless sensor networks; Routing Protocol; Lifetime.

Dédicace

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon bonheur et la femme que j'adore ; A ma mère qu'Allah ait pitié d'elle.

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père Abdelkarim.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères, mes sœurs et tous ma famille, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis et collègues d'étude.

BARMATI Mohammed Elsadiq

Dédicace

A la femme que j'aime, la femme qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie. A ma mère qu'Allah ait pitié d'elle.

A mon père YUCEFI MOHAMMED, l'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et mon respect.

A mon très chers frères Med, Wahid et Rahim. A Mes chères sœurs Djamila, Fatima, Malika et Bouchra .Spécial dédicace á ma collègue et chère amie Saadia, Amina et Amal. A tous les membres de mes familles .A tous mes amis de la promotion, mes professeurs... A tous ceux qui par un mot m'ont donné la force pour continuer.

YUCEFI Hanane.

Remerciements

Nous remercions en premier lieu au DIEU pour nous avoir donné la force de réaliser ce travail.

Aussi mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ainsi qu'à la réussite de cette formidable année académique.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur MOHAMMED DEMRI, pour sa générosité et la grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges professionnelles.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté à participer à l'évaluation de notre travail.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract	II
Dédicaces.....	III
Remerciements	V
Table des matières	VI
Liste des figures	IX
Liste des tableaux.....	X
Liste des abréviations.....	XI
Introduction générale.....	1
 CHAPITRE 01: GENERALITES SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définitions.....	4
I.2.1 Un capteur	4
I.2.2 Un capteur intelligent.....	4
I.3 Architecture d'un capteur.....	4
I.3.1 Architecture matérielle d'un capteur.....	4
1. Unité d'énergie	5
2. Unité de captage.....	5
3. Unité de traitements (processeur).....	5
4. Unité de communication.....	6
5. Unité de stockage(Mémoire).....	6
I.3.2 Architecture logiciel d'un capteur.....	6
I.4 Types de capteurs.....	6
I.5 Classification des capteurs.....	7
I.5.1 Apport énergétique.....	7
I.5.2 Type de sortie.....	7
I.6 Caractéristiques liées aux RCSFs	8
I.6.1 L'auto configuration des nœuds de apteur.....	8
I.6.2 La qualité de service (QoS).....	8
I.6.3 Les types de communications	8
I.6.4 L'absence de l'adressage fixe des nœuds.....	9
I.6.5 Le passage à l'échelle (Scalabilité)	9
I.6.6 Type de réseau.....	9
I.6.7 Tolérance aux pannes	9
I.7 Domaine d'application	10
I.7.1. Domaine militaire	10
I.7.2 Domaine civil	10
I.7.3 Domaine de la surveillance de l'environnement et des habitats.....	10
I.7.4 Domaine agricole et environnemental	11
I.7.5 Domaine médical	11
I.7.6 Domaine de transport	11

I.7.7	Domaine commerciale	11
I.7.8	Domaine domestique	11
I.8	Les réseaux Ad hoc.....	12
I.8.1	Les problèmes de l'ad hoc.....	13
I.9	Réseaux de capteurs sans fil (RCSF).....	13
I.9.1	Description des réseaux de capteurs	14
I.9.2	Architecture de communication dans les RCSF	15
I.9.3	Spécificités des RCSF	16
I.9.4	Agrégation de données dans un RCSF	18
I.10	Conclusion	18

CHAPITRE 02: L'ÉTAT DE L'ART

II.1	Introduction.....	19
II.2	La communication dans les RCSFs.....	19
II.3	Le fonctionnement de la pile protocolaire.....	20
II.4	Classification des protocoles de routage pour les RCSFs.....	21
II.4.1	Selon la structure du réseau	21
II.4.1.1	La topologie plate	21
II.4.1.2	La topologie hiérarchique.....	21
II.4.1.3	La topologie de la localisation	22
II.4.2	Selon les fonctions du protocole	23
II.4.2.1	La qualité de service	23
II.4.2.2	Négociation	23
II.4.2.3	Multi-chemin	23
II.4.3	Selon le mode de transmission	23
II.4.3.1	Protocole proactif	23
II.4.3.2	Protocole réactif.....	24
II.4.3.3	Protocole hybride	24
II.4.4	Selon type d'application.....	24
II.4.4.1	Event-driven	24
II.4.4.2	Time-driven.....	24
II.4.5	Selon le mode de fonctionnement.....	25
II.4.5.1	Découverte.....	25
II.4.5.2	Interrogation	25
II.4.5.3	Acheminement	25
II.4.6.1	Nodecentric	25
II.4.6.2	Data centric.....	25
II.4.6.3	Position centric.....	25
II.5	Caractéristique d'un protocole de routage hiérarchique	25
II.6	L'objectif du routage hiérarchique pour les (RCSFs).....	26
II.7	Protocoles de routage hiérarchique pour les (RCSFs).....	26
II.7.1	LEACH.....	26
II.7.2	LEACH-C.....	28
II.7.3	PEGASIS.....	29
II.7.4	HEED.....	31
II.8	Tableau comparatif pour les protocoles de routage hiérarchique étudiés.....	32
II.9	Conclusion.....	33

CHAPITRE 03: LA RECHERCHE COUCOU VIA VOL DE LEVY ET LA MODELISATION DE L'ALGORITHME PROPOSE

III.1 Introduction.....	34
III.2 Algorithme de Recherche Coucou (CS).....	35
III.2.1 Inspiration.....	35
III.2.2 Principe	35
III.2.3 Levy flight	37
III.2.4 Initialisation de l'algorithme.....	38
III.2.5 Description de l'algorithme.....	38
III.2.6 Pseudo-code de l'algorithme.....	39
III.2.7 Les variantes de la recherche coucou.....	40
III.3 Algorithme proposé: ECSBCP (Enhanced Cuckoo Search Based Clustering Protocol).....	41
III.3.1 Hypothèses.....	41
III.3.2 Description générale et les objectifs de l'algorithme proposé	41
III.3.3 Description détaillée de l'algorithme proposé	42
III.3.3.1 Types des nœuds utilisés par notre algorithme proposé.....	42
III.3.3.2 Déroulement de l'algorithme	43
III.3.3.2.1 Phase d'initialisation	43
III.3.3.2.2 Phase de transmission	46
III.4 Conclusion	49

CHAPITRE 04: IMPLIMENTATION ET DICUSSION

IV.1 Introduction.....	50
IV.2 A propos de l'environnement MATLAB.....	50
IV.3 Les étapes d'exécution de l'application.....	51
IV.3.1 Lancement d'application.....	51
IV.3.2 Description et paramètres de simulation.....	51
IV.4 Paramètres de simulation.....	52
IV.4.1 Energie de capture	52
IV.5 Simulation et résultat.....	54
IV.5.1 Mesure de performance	54
IV.5.2 Discussion et résultats	60
IV.6 Conclusion.....	61

Conclusion générale.....	62
Bibliographie	63

Liste des figures

Figure I.1: Architecture matérielle d'un capteur	5
Figure I.2: Quelques exemples de capteurs	7
Figure I.3: Quelques domaines d'applications des RCSF	12
Figure I.4: Les échanges dans les modes Infrastructure et Ad-hoc	13
Figure I.5: Exemples des capteurs sans fils	14
Figure I.6: Le microcontrôleur	15
Figure I.7: Architecture de communication dans les RCSF	16
Figure II.1: La pile protocolaire de communication	20
Figure II.2: Topologie plate	21
Figure II.3: Topologie hiérarchique	22
Figure II.4: Algorithme de routage LEACH	28
Figure II.5: Construction de chaînes en utilisant l'algorithme avide	30
Figure II.6: Le passage de jeton	30
Figure II.7: Illustration de protocole PEGASIS	31
Figure III.1: Un œuf de coucou (gris) dans un nid d'acceteur mouchet	36
Figure III.2: Levy flight (a), marche aléatoire simple (b) et mouvement brownien (c) ...	37
Figure III.3: les variantes de la recherche coucou	40
Figure III.4: Organigramme de formations des clusters part un	44
Figure III.5: Organigramme de formations des clusters part deux	44
Figure III.6: Organigramme de l'étape de création du calendrier de transmission	45
Figure III.7: L'organigramme de l'algorithme de simulatio.	48
Figure VI.1: Interface de la simulation	51
Figure VI.2: La fenêtre de résultat de la simulation	52
Figure VI.3: Modèle de consommation d'énergie pour la communication	53
Figure VI.4: la consommation d'énergie après 250 ronds	56
Figure VI.5: Nombre des nœuds vivants	57
Figure VI.6: Les ronds relatif au premier nœud mort, demi-nœuds morts et derniers nœuds morts	58
Figure VI.7: Nombre de paquet reçu par la station de base	59
Figure VI.8: Le nombre paquets de contrôle	60

Liste des tableaux

Tableau II.1: Classification des protocoles de routage hiérarchique	33
Tableau III.1: Les variantes de la recherche Coucou	40
Tableau IV.1: Les paramètres de simulation	55
Tableau IV.2: Les paramètres de l'algorithme CS.....	55
Tableau IV.3: la consommation d'énergie après 250 chaque rond	55
Tableau IV.4: Le nombre des nœuds vivants dans quelque rond	56
Tableau IV.5: Les ronds relatif au premier nœud mort, demi-nœuds morts et derniers nœuds morts	57
Tableau IV.6: Le nombre paquets reçu par la station de base dans certain rond.....	58
Tableau IV.7: Le nombre paquets de contrôle dans certain ronds.....	59

Liste des abréviations

ASIC : Application Specific Integrated Circuit.

BS : Base Station.

CH: Cluster Head.

CPU : Computer Processing Unit.

CAN : Convertisseur Analogique-Numérique

DSP : Digital Signal Processors.

ECSBCP: Enhanced Cuckoo Search Based Clustering Protocol.

FDN: First dead node.

FPGA : Field Programmable Gate Array.

GSM: Global System for Mobile Communications

GPS : Global Position System.

GN: General Node.

GPS : Global Positioning System.

GUI : Graphique User Interfaces.

HDN: Half dead node.

ID: Identifier.

IHM: Interface Homme Machine.

ISO: International Standardization Organization.

Join-REQ : Join Request.

MANETs: Mobile Ad hoc NET Works.

MIPS : millions d'instructions par seconde.

LDN: Last dead node.

OSI: Open System Interconnexion

QoS : Quality Of Service.

RF : la Radiofréquence.

RCSF: Réseau de capture sans fil.

Sink : Satation de base.

TDMA: Time Division Multiplexing Access.

VCH : Vice Cluster Head.

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

WSN: Wireless Sensor Networks.

Introduction générale

Les progrès technologiques dans le domaine de l'électronique et le domaine des communications sans fil ont donné naissance à la création d'équipements à faible coût, appelés nœuds capteurs ou "motes", ces derniers peuvent communiquer via des ondes hertziennes (la radio) et collaborer entre eux pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Ce nouveau type de réseaux présente une grande amélioration comparé aux capteurs classiques qui sont généralement positionnés loin du phénomène surveillé. La position des nœuds utilisés n'est pas obligatoirement conçue au préalable, ce qui permet leur déploiement aléatoire dans les terrains inaccessibles ou pendant les opérations de secours aux cas de désastres.

Les réseaux de capteurs sont constitués de plusieurs capteurs minuscules ou nœuds ayant une caractéristique essentielle résidant dans l'absence d'infrastructure fixe et ayant une topologie changeante due à la mobilité des capteurs et pose le problème de l'épuisement de leurs batteries. Ces capteurs transmettent régulièrement les données au nœud central où les traitements sont accomplis et les données sont fusionnées jusqu'à l'aboutissement à la station de base.

Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil ou les WSNs "Wireless Sensor Networks" sont le routage, l'énergie consommée par les nœuds, la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité imprévisible des nœuds, etc. Ces capteurs sont parfois déployés dans des zones hostiles, Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour Augmenter son durée de vie en réduisant la perte d'énergie.

Les progrès récents dans les réseaux de capteurs sans fil ont conduit au développement de nombreux protocoles de routage hiérarchiques où la conservation de l'énergie est un facteur primordial.

Dans ce mémoire, nous proposons ECSBCP comme un nouveau protocole de routage hiérarchique efficace en énergie pour les RCSF.

Ce nouveau protocole est basé sur un algorithme bio-inspirée qui simule le comportement du coucou afin de sélectionner dynamiquement les CH optimale et former les clusters dans les RCSF.

Notre travail est organisé en quatre chapitres selon un plan méthodologique suivant :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil leurs architectures de communication et leurs applications. Nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent sur la conception des réseaux de capteurs sans fil.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un état de l'art sur un ensemble des protocoles des routages hiérarchiques.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties, dans la première partie nous présenterons l'algorithme de CS (Cuckoo Search) et son principe de fonctionnement. Dans la deuxième partie, nous présenterons notre protocole de routage hiérarchique pour les RCSFs (ECSBCP)

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'implémentation et l'évaluation des performances de notre protocole en le comparant au célèbre LEACH selon plusieurs critères. Ensuite, les résultats obtenus seront analysés et discutés.

Chapitre I

Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction

Les progrès dans le domaine de l'électronique miniaturisée et les communications sans fil ont donné naissance à des composants capables de prélever des grandeurs environnementales, physiologiques etc. Ces composants sont appelés des nœuds capteurs et ils ont la capacité de s'auto-organiser pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Les RCSF permettent de faciliter le suivi et le contrôle à distance de l'environnement physique avec une meilleure précision. Ils peuvent aussi être déployés pour exploiter diverses applications (environnementales, militaires, médicales, etc.). En outre, un réseau de capteurs est constitué généralement d'un grand nombre de nœuds capteurs, car ces derniers sont sujets à des pannes accidentelles ou intentionnelles. Chaque nœud est composé principalement d'un ou plusieurs capteurs, d'une unité de traitement et d'un module de communication. Ces nœuds communiquent entre eux selon une certaine topologie du réseau afin d'acheminer les informations à un centre de contrôle distant de la zone de leur déploiement. La mise en place d'un RCSF pose de nombreux problèmes parmi lesquels le routage des informations vers la station de base via les différents nœuds du réseau. Dans cette optique plusieurs contributions ont été proposées dans la littérature. Ces contributions visent à minimiser la consommation d'énergie ceci afin d'optimiser l'autonomie des nœuds qui constituent le réseau et par suite garantir une longue durée de vie pour le réseau entier.

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil avec un plan méthodologique que nous avons adopté. Nous commençons par une définition d'un capteur, son architecture, ses types etc. Ensuite nous présentons les RCSF, leur architecture de communication, leurs différentes contraintes ainsi que leurs divers types d'applications et finir par une petite conclusion.

I.2 Définitions

I.2.1 Un capteur

Un capteur est le dispositif qui transforme une grandeur physique observée (température, pression, humidité,...etc.) en une grandeur utilisable (intensité électrique, position d'un flotteur) [1]. Pour cela, il possède au moins un transducteur dont le rôle est de convertir une grandeur physique en une autre.

I.2.2 Un capteur intelligent

Le terme capteur intelligent (Smart Sensor ou Intelligent Sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques [2]. Par rapport à un capteur classique, un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement des données, aux calculs, à la communication numérique [1]. Il est donc caractérisé par [2] sa capacité à effectuer une collecte des mesures, les traiter et à les communiquer au monde extérieur.

La deuxième définition étant la plus utilisée pour définir un capteur, on constate que le mot capteur est utilisé par abus de langage pour désigner un capteur intelligent. Pour ne pas rompre avec la terminologie usuelle, dans le reste de notre travail, lorsque nous parlerons d'un capteur, nous sous-entendrons un capteur intelligent.

I.3 Architecture d'un capteur

I.3.1 Architecture matérielle d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé principalement d'une unité de : captage, traitement, stockage, communication, et énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application [3], comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (Global Positioning System), un générateur d'énergie (exemple : cellules solaires) ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer. Ces éléments principaux et optionnels (représentés par les traits discontinus) sont visibles sur la figure I.1.

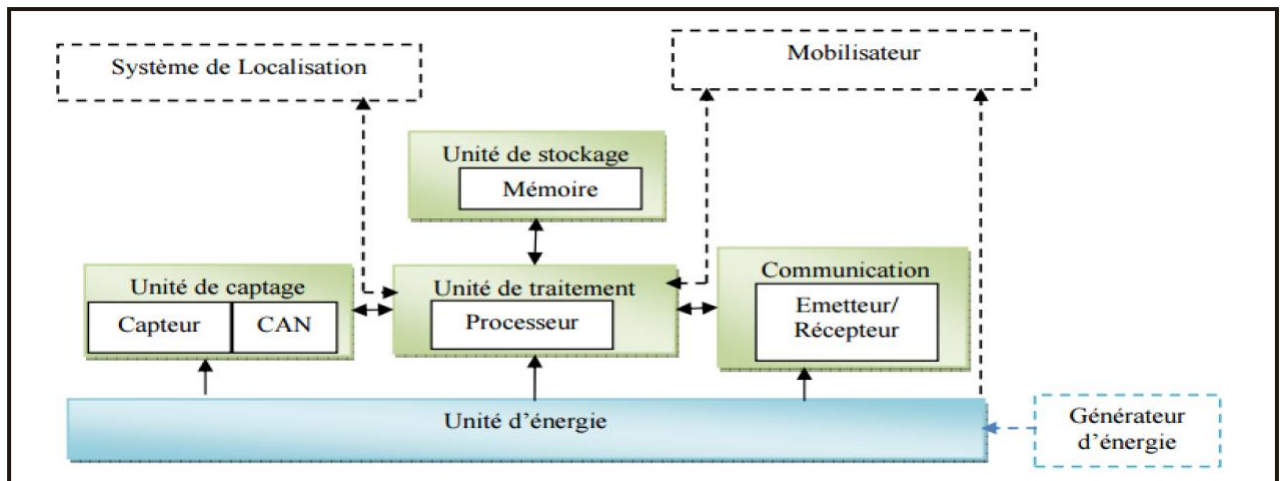


Figure I.1 : Architecture matérielle d'un capteur. [3]

1. Unité d'énergie

Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie [4], pour alimenter tous ses composants. Les batteries utilisées sont soit rechargeables ou non. Souvent, dans les environnements sensibles, il est impossible de recharger ou changer une batterie. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs.

2. Unité de captage

La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Elle est composée de deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique(CAN). Ce dernier transforme ces signaux en données numériques et les transmet à l'unité de traitement. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage [5].

3. Unité de traitements (processeur)

Il recueille des données de l'unité de captage ou d'autres capteurs, effectue un traitement sur ces données (si nécessaire) et décide quand et où les envoyer. Il doit exécuter des programmes et des protocoles de communication différents. Les types de processeurs qui peuvent être utilisés dans un capteur incluent le Microcontrôleur, les DSP (Digital Signal Processors), les FPGA (Field Programmable Gate Array) et les ASIC (Application Specific Integrated Circuit) [5]. Parmi toutes ces alternatives, le Microcontrôleur a été le processeur le plus utilisé pour les capteurs à cause de sa flexibilité

à être reliés à d'autres composants (comme par exemple l'unité de communication), à son bon prix et sa faible consommation énergétique [5, 6, 7].

4. Unité de communication

Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil. Les différents choix de média de transmission incluent la Radiofréquence (RF), le Laser et l'Infrarouge [5].

5. Unité de stockage (Mémoire)

L'unité de stockage inclut la mémoire de programme (dont les instructions sont exécutées par le processeur) et la mémoire de données (pour conserver des données fournies par l'unité de captage et d'autres données locales). La taille de cette mémoire est souvent limitée essentiellement par les considérations économiques et s'améliorera aussi probablement au fil des années [8].

I.3.2 Architecture Logicielle

La contrainte énergétique des capteurs exige l'utilisation de systèmes d'exploitation légers tels que TinyOS [9] ou Contiki [10]. Cependant, TinyOS reste toujours le plus utilisé et le plus populaire dans le domaine des RSCF. Il est libre et est utilisé par une large communauté de scientifiques dans des Simulations pour le développement et le test des algorithmes et protocoles.

I.4 Types de capteurs

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 [12].

La plupart des capteurs dépendent de l'application pour lesquels ils ont été conçus (capteur aquatique, sous-terrain, ...etc.). Il est plus intéressant de décrire les capteurs les plus utilisés et leur évolution au cours du temps.

En l'occurrence, la figure I.2 illustre l'évolution des capteurs au cours de ces vingt dernières années. Cette représentation met en avant l'importance des travaux de recherche de l'université de Berkeley dans l'essor des réseaux de capteurs, sachant que l'entreprise Xbow (aussi appelé Crossbow) qui fait jusqu'à aujourd'hui continue à faire office de référence dans la fabrication de capteurs est née au sein de la célèbre université

californienne.



Figure I.2 : Exemples d'un capteur [17]

I.5 Classification des capteurs

Les capteurs ont plusieurs modes de classification dont :

I.5.1 Apport énergétique [16]

Capteurs actifs : Ils sont constitués d'un ensemble de transducteurs alimentés (exemple : chronomètre mécanique, jauge d'extensomètre appelée aussi jauge de contrainte, gyromètre...). Ce sont des capteurs que l'on pourrait modéliser par des générateurs comme les systèmes photovoltaïques et électromagnétiques. Ainsi ils génèrent soit un courant, soit une tension en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré.

Capteurs passifs : Ils n'ont pas besoin d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner (exemple : thermistance, potentiomètre, thermomètre à mercure...). Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique étudié (mesuré) engendre une variation de l'impédance.

I.5.2 Type de sortie [16]

Les capteurs peuvent aussi faire l'objet d'une classification par type de sortie :

- **Capteurs analogiques** : Le signal des capteurs analogiques peut être du type : sortie tension, sortie courant, règle graduée ... etc.
- **Capteurs numériques** : Le signal des capteurs numériques peut être du type : Train d'impulsions avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise, Code numérique binaire, Bus de terrain ... etc.

I.6 Caractéristiques liées aux RCSF [44]

Un ensemble de caractéristique sont importantes pour l'accomplissement des tâches assignées aux applications. Les plus importantes sont :

I.6.1 L'auto configuration des nœuds de capteur

Dans un RCSF, les nœuds sont déployés soit d'une manière aléatoire (missile, avion...), soit placés nœud par nœud par un humain ou un robot. Ainsi, un nœud capteur doit avoir des capacités d'une part pour s'auto-configurer dans le réseau, et d'autre part pour collaborer avec les autres nœuds dans le but de reconfigurer dynamiquement le réseau en cas de changement de topologie du réseau.

I.6.2 La qualité de service (QoS)

La QoS pour les RCSF est que la quantité et la qualité d'informations extraites à partir des puits devient appropriée. 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.

I.6.3. Les types de communications

Il existe différents types de communication utilisée dans les RCSF:

- **Unicast**: ce type de communication utilisé pour échanger des informations entre deux nœuds sur le réseau.

- **Broadcast** : la station de base transmet des informations vers tous les nœuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données bien précises, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle.

- **Local Gossip** : ce type de communication est utilisé par des nœuds situés dans une région bien déterminée qui collaborent ensemble afin d'avoir une meilleure estimation de l'évènement observé et d'éviter l'émission du même message vers le nœud sink ce qui contribue à consommer moins d'énergie.

- **Convergecast** : il est utilisé dans les communications entre un groupe de nœuds et un nœud bien spécifique, l'avantage de ce type de communication est la diminution de contrôle d'entête des paquets, ce qui économise l'énergie au niveau du nœud récepteur.

- **Multicast** : Il permet une communication entre un nœud et un groupe de nœuds, ce type est utilisé dans les protocoles qui incluent le « clustering » dans lesquels, le « cluster head » s'intéresse à communiquer avec un groupe de nœuds.

I.6.4 L'absence d'adressage fixe des nœuds

Les nœuds dans les réseaux sans fil classiques sont identifiés par des adresses IP. Cependant, cette notion n'existe pas dans les RCSF, ces derniers utilisent un adressage basé sur l'attribut du phénomène capté, on parle donc de l'adressage basé attribut.

En effet, les requêtes des utilisateurs ne sont pas généralement destinées à un seul nœud, mais plutôt, à un ensemble de nœuds identifiés par un attribut.

I.6.5 Le passage à l'échelle (Scalabilité)

Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels (personnel, local ou étendu), un RCSF peut contenir un très grand nombre de nœuds capteurs (des centaines, des milliers...etc.).

Un réseau de capteur est scalable parce qu'il a la faculté d'accepter un très grand nombre de nœuds qui collaborent ensemble afin d'atteindre un objectif commun.

I.6.6 Type de réseau

Le type de réseau influe sur le choix du type des protocoles et services à mettre en place. Ainsi, pour un réseau homogène où tous les nœuds disposent des mêmes ressources, il n'est pas judicieux d'utiliser un protocole de type centralisé. Du fait qu'il y a risque d'épuisement de la réserve énergétique du nœud sur lequel tourne ce protocole. Tandis que le scénario est fort possible dans un réseau hétérogène où il existe des nœuds riches en ressources pouvant assurer une telle fonction (comme le routage par exemple).

I.6.7 Tolérance aux pannes

Les contraintes matérielles provoquent, fréquemment, un blocage ou une mise hors usage des capteurs sans fil pour des laps de temps importants. Ces défauts peuvent se produire en raison d'un manque d'alimentation électrique, de dommages physiques, d'interférence environnementale ou des problèmes liés aux logiciels. Le nombre de pannes qui permet au réseau de continuer convenablement ses fonctions définit sa tolérance aux pannes. Les protocoles et les algorithmes conçus pour les RCSF visent à surmonter les pannes fréquentes des nœuds par la redondance. La tolérance aux pannes d'un réseau peut être améliorée en augmentant la densité de déploiement des capteurs. En conséquence, même si un nœud échoue, d'autres nœuds prennent le relais pour assurer la connectivité du réseau.

I.7 Domaine d'application [44]

Les réseaux de capteurs sans fil ont un champ d'application vaste et diversifié. Ceci est rendu possible par leur coût faible, leur taille réduite, le support de communication sans fil utilisé et la large gamme des types de capteurs disponibles. Un autre avantage est la possibilité de s'auto-organiser et d'établir des communications entre eux sans aucune intervention humaine, notamment dans des zones inaccessibles ou hostiles, ce qui accroît d'avantage le nombre de domaines ciblés par leur application (environnement, catastrophes naturelles, bâtiments intelligents, la santé, l'agriculture, l'industrie...etc.). Nous présentons dans ce qui suit les domaines les plus ciblés par les RCSF :

I.7.1. Domaine militaire

Les RCSF sont le résultat de la recherche militaire. Ils sont utilisés dans la surveillance des champs de bataille pour connaître exactement la position, le nombre, l'armement (chimique, biologique, nucléaire...etc.), l'identité et le mouvement des soldats et ainsi empêcher leur déploiement sur des zones à risques.

I.7.2 Domaine civil

Apparus dans plusieurs contextes notamment dans la surveillance des habitations (concept de bâtiments intelligents), des infrastructures, des installations et des zones à risques. Leur utilisation permet de réduire considérablement le budget consacré à la sécurité des humains tout en garantissant des résultats sûrs et fiables.

I.7.3 Domaine de la surveillance de l'environnement et des habitats

C'est le domaine propice des applications des RCSF, les variables comme la température, la pression et l'humidité se distribuent sur une zone très vaste ce qui nécessite des moyens importants en terme de coût. Des capteurs environnementaux peuvent être utilisés pour étudier les effets des changements climatiques et des maladies qui touchent la faune et la flore ; les RCSF permettent de suivre de près le développement de la population des espèces menacées dans la nature.

1.7.4 Domaine agricole et environnemental

Les réseaux de capteurs sans fil sont très utiles dans la protection de l'environnement. Ils peuvent être utilisés pour la détection des feux de forêts, des inondations, surveillance des volcans, contrôle de la qualité de l'air par le suivi de l'évolution de la densité moyenne de CO₂, le déplacement des animaux...etc. Dans le domaine agricole, on cite le déploiement des capteurs sur un champ agricole afin d'identifier les zones sèches et permettre leur irrigation à temps.

1.7.5 Domaine médicale

Les RCSF permettent par exemple la surveillance de l'état de santé des patients qu'ils soient au sein de l'établissement ou même ailleurs, et ce en permanence.

1.7.6 Domaine de transport

Les RCSF permettent la surveillance des réseaux ferroviaires ou routiers ainsi que d'éventuelles intrusions.

1.7.7 Domaine domestique

En plaçant, sur le plafond ou dans le mur, des capteurs, on peut économiser l'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes.

1.7.8 Domaine commerciales

Des nœuds capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Un client attendant un paquet peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position du paquet. Des entreprises manufacturières, via des réseaux de capteurs pourraient suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts [47].

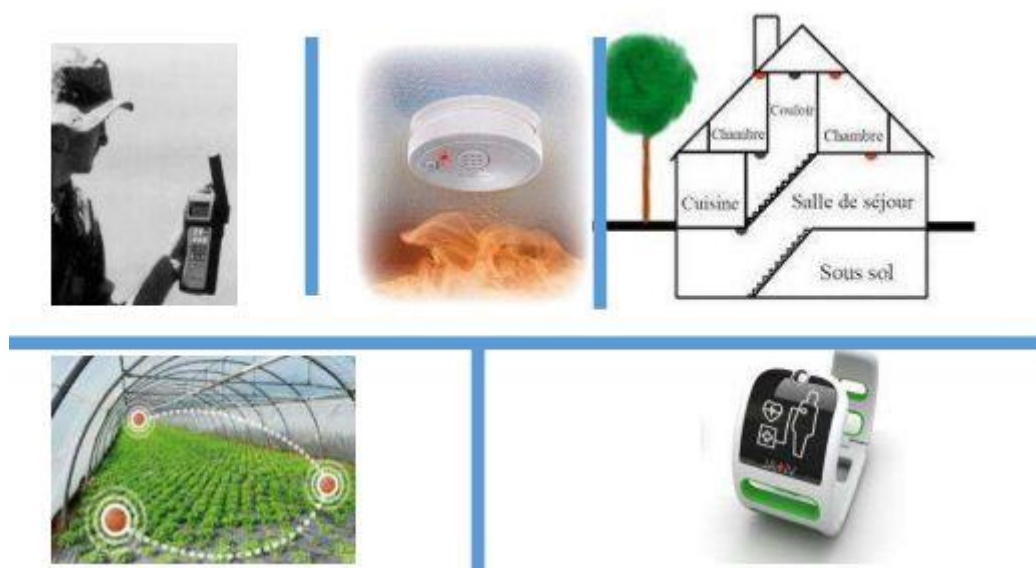


Figure I.3 : Quelques domaines d'applications des RCSF [15]

I.8 Les réseaux Ad hoc

Les réseaux Ad hoc (en latin : « **qui va vers ce vers quoi il doit aller** », c'est-à-dire « formé dans un but précis », telle qu'une commission **ad hoc**, formée pour régler un problème particulier sont des réseaux sans fil capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement.

Les réseaux ad hoc, dans leur configuration mobile, sont connus sous le nom MANet (pour Mobile Ad hoc NETWORKS). [45]

Chaque entité (nœud) communique directement avec sa voisine. Pour communiquer avec d'autres entités, il lui est nécessaire de faire passer ses données par d'autres qui se chargeront de les acheminer. Pour cela, il est d'abord primordial que les entités se situent les unes par rapport aux autres, et soient capables de construire des routes entre elles : c'est le rôle du protocole de routage.

Ainsi, le fonctionnement d'un réseau ad hoc se différencie notablement d'un réseau comme le réseau GSM, les réseaux Wi-Fi avec des points d'accès : là où une ou plusieurs stations de base sont nécessaires à la plupart des communications entre les différents nœuds du réseau (mode Infrastructure), les réseaux ad hoc s'organisent d'eux-mêmes et chaque entité peut jouer différents rôles. [45]

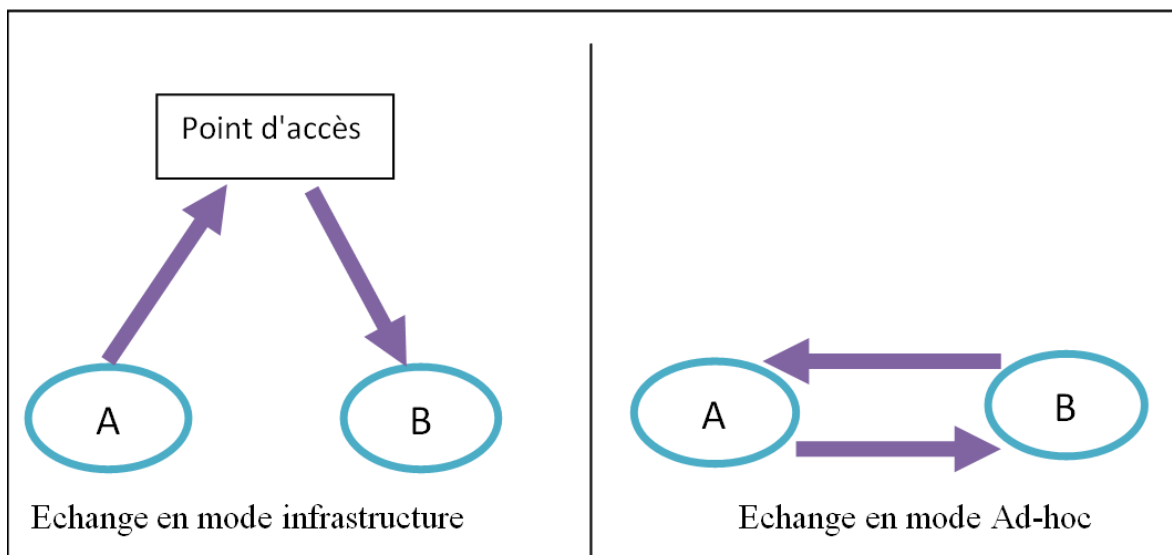


Figure I.4 : Les échanges dans les modes Infrastructure et Ad-hoc [45]

L'utilisation la plus simple et la plus courante des réseaux ad hoc est faite par les réseaux sans fil Wi-Fi en permettant une mise en place rapide d'une connexion réseau entre deux ordinateurs [45].

I.8.1 Les problèmes de l'ad hoc

Les principaux problèmes des réseaux ad hoc, et les problématiques à gérer sont [45]:

- ✓ Absence d'infrastructure ;
- ✓ Bande passante limitée ;
- ✓ Perte de données ;
- ✓ Perte de routes ;
- ✓ Contraintes de consommation d'énergie ;
- ✓ Sécurité limitée;
- ✓ Erreur de transmission;
- ✓ Interférences ;
- ✓ Nœuds cachés;
- ✓ Auto-configuration et détection d'adresses dupliquées.

I.9 Réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Grâce au progrès déployé dans le domaine de la miniaturisation des systèmes de micro-électro-mécanique (MEMS) et des applications sans fil, une nouvelle branche de réseaux mobile a été créée afin d'offrir des solutions économiquement intéressantes pour la surveillance à distance et le traitement des données dans des environnements complexes : les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor networks). Ces derniers permettent de réduire l'encombrement, le coût et la consommation d'énergie et d'augmenter la précision

et les performances des capteurs, des processeurs et des circuits spécifiques. Un nombre très important de capteurs peut donc être envisagé, intégré et organisé en réseau.



Figure 1.5 : Exemples des capteurs sans fils [46].

Un réseau de capteur sans fil (RCSF) est un type particulier de réseau ad-hoc défini par un ensemble coopérant de nœuds capteurs dispersés dans une zone géographique appelée zone de captage afin de surveiller un phénomène et récolter ses données d'une manière autonome [46].

I.9.1 Description des réseaux de capteurs

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est composé d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil [12].

Un réseau de capteurs se compose de deux types de nœuds : des simples capteurs et des collecteurs d'informations appelés puits (sink en anglais) Le capteur est composé d'un micro-contrôleur et d'un circuit radio [46]:

✓ Le micro-contrôleur

Est simple et peut être embarqué aisément. Cet appareil doit répondre à l'exigence d'une faible consommation d'énergie tout en ayant la possibilité d'exécuter de simples opérations et de posséder une mémoire permettant d'emmagasiner de l'information. L'appareil doit aussi présenter la possibilité d'avoir un état oisif durant lequel il consomme une quantité d'énergie infinitésimale. Ces états oisifs peuvent parfois durer très longtemps. Le capteur peut se réveiller seulement pour capter la grandeur physique à mesurer et aussi pour effectuer des opérations de réseaux comme dialoguer avec des capteurs voisins ou relayer l'information provenant d'autres capteurs [46].



Figure 1.6 : Le microcontrôleur.

✓ Le circuit radio

Assure la communication du capteur avec d'autres appareils via des liens radios. Ces derniers ont facilité l'implantation massive de capteurs et ont offert une indépendance précieuse car il a réduit les coûts du câblage et de l'ingénierie nécessaire pour les installations passées. Grâce à la communication sans fil, un installateur peut déposer facilement des capteurs sans se soucier de la complexité des opérations pour les atteindre afin de relever les mesures. Il suffit d'être dans le champ de couverture radio pour transmettre ou recevoir l'information requise.

Avec ses capacités de traitement et de mémorisation, le capteur peut devenir un nœud actif dans un réseau relativement large. Lorsque le nombre de capteurs devient conséquent, la communication en réseau devient indispensable. Il n'est en effet alors plus possible d'atteindre un capteur directement par un câble ou même par une connexion radio. C'est là alors qu'on peut parler de véritables réseaux de capteurs capables de s'auto-configurer et de s'auto-organiser de manière dynamique. Ces propriétés offrent un très large spectre d'applications, notamment dans les domaines militaires, de l'environnement, de l'écologie, ...etc.[46]

I.9.2 Architecture de communication dans les RCSF

Le processus d'acheminement de l'information des capteurs à la station de base peut prendre quatre formes. Dans les architectures à plat, les capteurs peuvent communiquer directement avec la station de base en utilisant une forte puissance (figure 1.4 (a)), ou via un mode multi-sauts avec des puissances très faibles (figure 1.4 (b)), alors que dans les architectures hiérarchisées, le nœud représentant le cluster, appelé cluster head, transmet directement les données à la station de base (figure 1.4 (c)), ou via un mode multi-saut entre les cluster heads (figure 1.4 (d)) [19].

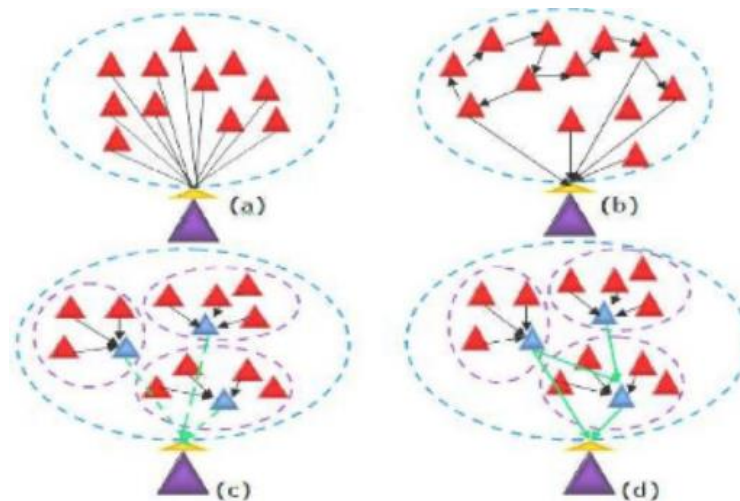


Figure I.7 : Architecture de communication dans les RCSF [18]

I.9.3 Spécificités des RCSF [19]

- **Durée de vie :** C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du dernier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures à plusieurs années selon l'emplacement de la zone d'intérêt.

- **Topologie dynamique :** Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phrases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...), redéploiement de nœuds additionnels.

- Tolérance aux fautes, adaptabilité et fiabilité dans un RCSF

Les réseaux de capteurs sont requis pour fonctionner en s'adaptant aux changements environnementaux que les capteurs contrôlent. Les réseaux devraient être capables de s'auto-organiser en fonction des facteurs environnementaux. La fiabilité est la capacité de maintenir les fonctionnalités de réseau de capteurs sans la moindre interruption qui sera due à l'échec du nœud capteur. Ce dernier peut échouer en raison du manque d'énergie, de dommages physiques, de problèmes de communication, d'inactivité, ou d'interférence environnementale. De ce fait, le réseau devrait pouvoir détecter l'échec d'un nœud et s'organiser, se reconfigurer et récupérer des échecs de nœud sans desserrer aucune information.

- **Passage à l'échelle dans un RCSF :** Le nombre de capteurs utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil peut varier de quelques entités à plusieurs dizaines de milliers.

C'est d'ailleurs la principale utilité des réseaux de capteurs qui doivent pouvoir s'auto-organiser à une grande échelle et être efficace quel que soit leur nombre. Pour cela les protocoles des réseaux de capteurs sans fil doivent être capables de fonctionner et de s'adapter selon le nombre de nœuds.

- **Puissance de calcul dans un RCSF** : Malgré les progrès récents dans la fabrication de capteurs de plus en plus puissants, les capteurs actuels souffrent d'un manque de puissance de calcul (par exemple seulement 16 Mhz de puissance et 128 K-octets de mémoire programmable pour un capteur MicaZ). Cette faible puissance ne permet pas d'utiliser des algorithmes complexes, et particulièrement des algorithmes cryptographiques gourmands en ressources CPU. De plus, la vocation des capteurs sans fil est d'être en très grand nombre et leur utilisation dans des applications avec un nombre de nœuds élevé nécessite l'utilisation de capteurs bon marché, ce qui implique des capteurs avec une puissance de calcul très faible. La faiblesse de puissance de calcul est aussi préjudiciable pour le temps de réponse du réseau. Si l'on demande à un capteur d'effectuer de nombreux calculs, la latence va sensiblement augmenter.

- **Bande passante limitée** : Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Or, un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

- **Sécurité** : En fonction de l'application, la sécurité peut être critique. Le réseau devrait permettre la détection des intrusions pour assurer un fonctionnement correct 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.

- **Qualité de Service** : La qualité de service se réfère à la capacité du réseau à fournir des données fiable et à temps. Un grand nombre de service, à savoir, le débit ou la capacité de transport, ne sont pas généralement suffisant pour satisfaire un délai requis par une application, par conséquent, la vitesse de propagation de l'information peut être aussi cruciale que le débit. En plus de la capacité du réseau, de nombreux travaux importants dans les réseaux de capteurs sans fil sont effectués pour la garantie de la qualité de service (QoS), essentiellement sur le délai. Par exemple, dans certaines applications de contrôle en

temps réel, la valeur de l'information dégrade rapidement quand la latence augmente.

- **Energie d'un RCSF** : Les capteurs sont équipés de batteries, comme par exemple des piles LR6 dans le cas des MicaZ ou TelosB. L'énergie de ces batteries est limitée (plusieurs jours à quelques mois). De plus, les RCSF quand ils sont déployés, le sont souvent dans des zones difficiles d'accès pour l'homme et les capteurs sont en général déployés pour ne plus être modifiés. Il devient alors inenvisageable de vouloir changer les batteries des capteurs. Si le nombre de capteurs dépasse centaine entités, il est encore plus difficile d'intervenir pour trouver le capteur défaillant et changer sa batterie. La consommation d'énergie des réseaux de capteurs sans fil doit être la plus faible possible. Dans ce but, les capteurs actuels ont des périodes de veille durant leur inactivité pour préserver leur batterie. Enfin les communications sont les actions qui coûtent le plus cher en termes d'énergie. Pour cela, il est donc fortement nécessaire de limiter le nombre de communications entre capteurs.

I.9.4 Agrégation de données dans un RCSF

Diffuser les données captées sur le réseau peut facilement encombrer ce dernier. Certaines applications critiques comme les contrôleurs des centrales nucléaires exigent une transmission pressante et un traitement plus rapide des données qui peuvent dégrader l'exécution et perdre la fiabilité due à la congestion ou à latence dans le réseau. L'agrégation intelligente des données captées et l'élimination de l'information non désirée et redondante ainsi que la compression des données peuvent être une solution pour l'utilisation efficace de ressources, d'énergie et l'évitement de la congestion dans le réseau. Plusieurs algorithmes comme la diffusion dirigée [14] ont été proposés pour faciliter l'agrégation et la diffusion de données dans le contexte des RCSF.

I.10 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 ces applications : santé, environnement et industrie...etc.

Dans ce chapitre nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons introduit des concepts et des notions de bases nécessaires à la compréhension de la problématique dans la suite de ce mémoire.

Chapitre II

Le routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil

II.1 Introduction

Le réseau de capteurs est composé d'un nombre important de nœuds déployés dans des vastes zones dans lesquelles tous les nœuds sont connectés entre eux. En effet, l'échange de données est pris en charge par les communications multi-sauts. Toutefois, l'opportunité d'un protocole de routage particulier dépend principalement de la capacité des nœuds et des besoins de l'application visée. Pour assurer le passage à l'échelle (scalabilité) des protocoles de routage hiérarchique et garantir plus d'économie en énergie en augmentant la durée de vie des réseaux de capteurs sans fils, la hiérarchisation virtuelle des réseaux peut être adoptée. Cela consiste à regrouper les nœuds en groupes dits clusters où chaque cluster est représenté par un nœud appelé cluster Head (CH), dont le choix se base sur plusieurs critères à savoir l'identification, la distance vers la station de base, l'énergie résiduelle,...etc. Cette technique est appelée clustérisations.

Dans ce chapitre, nous abordons en premier lieu les principales classes des protocoles de routage dans les RCSF, dans la seconde partie nous nous intéressons aux différentes approches proposées pour le routage hiérarchique de données sur les réseaux de capteurs sans fils.

II.2 La communication dans les RCSF [44]

La communication des réseaux ad hoc traditionnel, utilisent le modèle OSI (Open System Interconnexion) de l'ISO (International Standardization Organization), par contre entre la station de base et tous les nœuds capteurs, ne suffit plus.

Les réseaux de capteur exigent des nouvelles limitations pour la conception des protocoles de communication, ces protocoles doivent prendre en compte des contraintes de conception propre aux RCSF (nouvelle pile protocolaire).

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau, est comprend cinq couches, la couche application qui assure l'interface avec les applications, la couche transport est chargée du transport des données et le contrôle de flux, la couche réseau permet de gérer l'adressage et le routage de données, la couche liaison de donnée est responsable multiplexage des flux des données et le contrôle des erreurs, la couche physique doit assurer des techniques d'émission/réception et de modulation de données d'une manière robuste. Ainsi que 3 niveaux (plan) qui sont : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches.

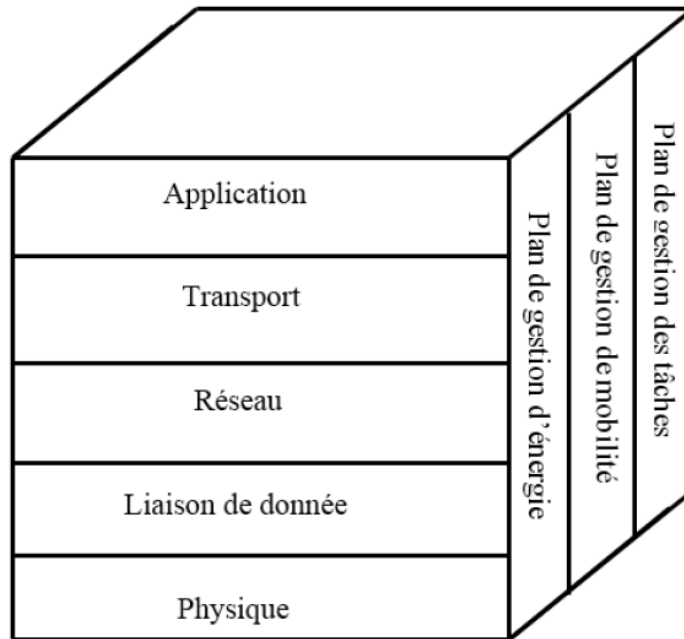


Figure II.1 : La pile protocolaire de communication.

II.3 Le fonctionnement de la pile protocolaire [44]

Les cinq couches de la pile protocolaire ont les mêmes fonctions que celle du modèle OSI.

1. Le plan de gestion d'énergie

Doit gérer la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies, par exemple le nœud doit se mettre en sommeil après la réception d'un message pour éviter la duplication des messages déjà reçus. Ou bien, quand le niveau de puissance d'un nœud est bas, il informe ses voisins qu'il ne peut pas participer au routage des messages, de cette façon la puissance restante est préservée pour la détection.

2. Le plan de la gestion de la mobilité

Détecte et enregistre le mouvement des nœuds, ainsi un nouveau itinéraire le reliant au puits ou aux autres capteurs est toujours maintenu.

3. Le plan de gestion de tâches

Lors d'une opération de captage dans une région donnée, les nœuds ne doivent pas travailler avec le même rythme. Pour cela, le niveau de gestion de tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail

coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent prolongé la durée de vie du réseau.

II.4 Classification des protocoles de routage pour les RCSF [44]

Les protocoles de routage sont conçus différemment pour répondre aux objectifs d'un réseau de capteurs sans fil. Plusieurs applications des capteurs exigent un routage efficace, sécurisé et dépense moins d'énergies assurant une bonne qualité de service, des temps de traitement et de transmission convenables. Le choix de conception d'un protocole de routage pour les RCSF est assez vaste et nous pouvons les classer par différentes façons comme suit :

II.4.1 Selon la structure du réseau

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil se classe généralement en :

II.4.1.1 La topologie à plate

Dans une topologie à plate, tous les nœuds de capteurs possèdent le même rôle et collabore entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par la simplicité des protocoles de routage, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi une habilité pour construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routages. De plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité due au fonctionnement identique des nœuds. La figure suivante illustre l'organisation des capteurs dans une topologie plate :

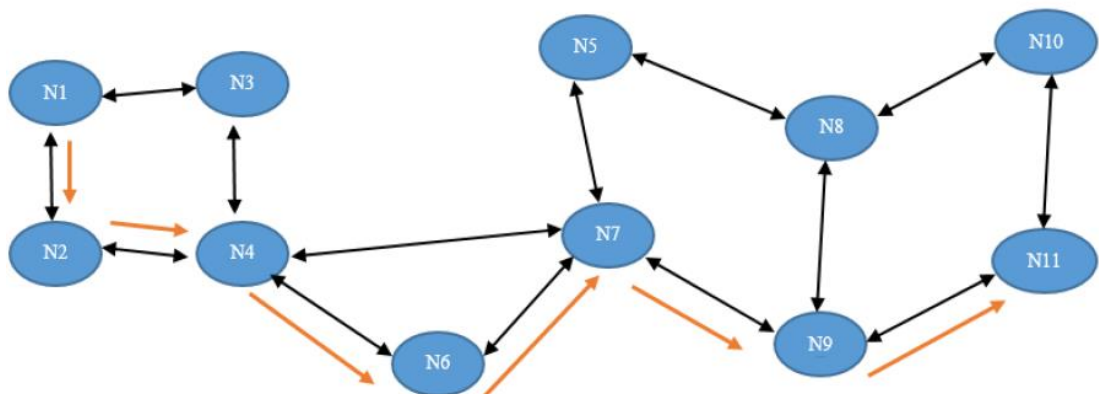


Figure II.2 : Topologie plate.

II.4.1.2 La topologie hiérarchique

Cette approche est basée sur la formation de clusters (zones communes). Le principe est de router les données récoltées par chaque nœud du cluster à son chef de zone (Cluster Head), qui est après des traitements sur leurs parties communes, les transmettra à la

prochaine destination (Si le CH ne pourra pas atteindre directement la station de base, les informations seront routées vers le prochain chef de zone). L'avantage est la réduction des coûts en communication et en énergie en minimisant le nombre de messages circulant sur le réseau, étant donné que les CH appliquent des fonctions d'agrégat sur les données du cluster ce qui permet de les combiner. L'inconvénient concerne la taille du réseau. En outre, quand la taille du réseau augmente, le processus d'élection du Cluster Head devient critique et gourmand en ressources. Un exemple de ce réseau est donné dans la figure suivante :

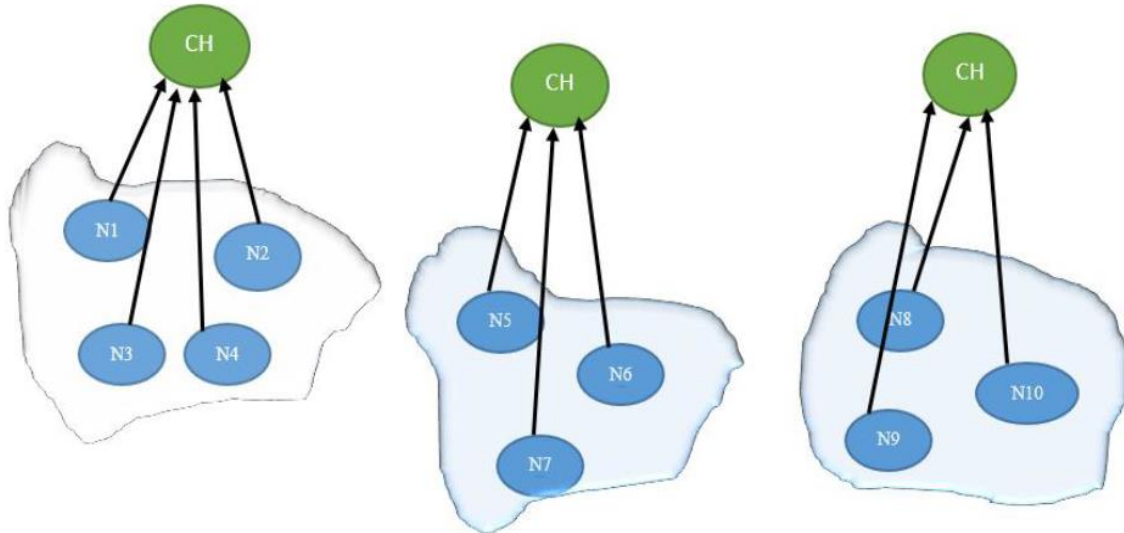


Figure II.3 : Topologie hiérarchique.

II.4.1.3 La topologie de la localisation

L'identification des emplacements géographiques des nœuds capteurs sur la zone de captage est d'une importance capitale pour les mécanismes de routage de données dans les RCSF. Ces informations de localisation permettent le calcul des positions des capteurs et les distances qui les séparent afin de construire les chemins les plus courts entre un nœud source et sa destination.

Cette approche de routage est plus économe en énergie car elle dispense les nœuds capteurs d'employer les méthodes aléatoires ou probabilistes pour rechercher les routes. De plus, la localisation des nœuds (et par conséquent de leurs régions) permet de diffuser des requêtes uniquement à ces régions et éviter leur diffusion en mode broadcast (diffusion globale à tous les nœuds) et ainsi réduire le nombre de transmissions d'une manière significative. L'inconvénient est la nécessité d'équiper les nœuds capteurs avec un système de localisation par satellite comme le GPS, ce qui impacte négativement sur la consommation d'énergie.

II.4.2 Selon les fonctions du protocole

II.4.2.1 La qualité de service

Dans les protocoles de routage basé sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple le retard, l'énergie, la largeur de la bande passante... Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications de surveillance (centrales nucléaires, applications militaires ...).

II.4.2.2 Négociation

Les nœuds du réseau entament une négociation sur les données à transmettre en diffusant un message contenant une métadonnée décrivant les données à transmettre. Les nœuds intéressés par ces données manifestent leur intérêt et les reçoivent en entier. La sélection des nœuds destinataires par l'intérêt réduit la bande passante et la consommation d'énergie du réseau. Cette méthode élimine les transmissions redondantes et établit des communications selon les ressources du réseau.

II.4.2.3 Multi-chemin

Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La fiabilité d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Pour cette raison, certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants, en d'autres termes, ils ne partagent qu'un nombre réduit de nœuds. Malgré leur grande tolérance aux pannes, ces protocoles nécessitent plus de ressources énergétiques et plus de messages de contrôle.

II.4.3 Selon le mode de transmission

II.4.3.1 Protocole proactif

Le calcul de routes se fait à priori ce qui facilite l'acheminement des données. Les informations des chemins à suivre par chaque donnée source vers une destination sur le réseau sont stockées dans une table de routage. Les tables de routage doivent être mises à jour régulièrement afin de corriger certains chemins coupés en raison du changement de topologie dus aux défaillances ou à la mobilité de certains nœuds capteurs. Cette mise à jour est assurée par la diffusion périodique des paquets de contrôle sur le réseau, ce qui n'est pas évident pour des réseaux de grande taille comme les réseaux de capteurs sans fil. L'établissement de routes se fait indépendamment des besoins réels de l'application et un bon nombre de ces routes est sauvegardé pour ne jamais être utilisées. Une autre limite

concerne la taille des tables de routage, notamment pour des réseaux de grande taille, qui pourrait dépasser les capacités de stockage des nœuds capteurs.

II.4.3.2 Protocole réactif

Également appelé routage à la demande, le routage réactif permet de créer les routes selon les besoins de l'application. Lorsqu'une requête est diffusée sur le réseau, la procédure de découverte de routes est lancée par les nœuds concernés par cette requête, et les réponses sont acheminées sur les routes créées. Cette procédure est lancée également pour des applications event-driven (applications orientées événements) pour chaque événement intéressant détecté. L'avantage d'établir des routes à la demande est la conservation d'énergie par rapport au routage proactif. La recherche de routes peut causer des lenteurs pour l'acheminement des données ce qui n'est pas approprié aux applications interactives et temps-réel.

II.4.3.3 Protocole hybride

C'est une combinaison des deux concepts de routage proactif et réactif. Des tables de routage sont stockées sur les nœuds capteurs de façon à établir des routes sur leur voisinage proche (généralement en deux sauts maximum). Au-delà de leur voisinage, le routage devient réactif et des procédures de recherche de routes sont lancées. Cette approche combine les avantages des deux autres approches proactive et réactive et réduit considérablement la taille des tables de routage ainsi que les délais d'établissement de routes.

II.4.4 Selon type d'application

II.4.4.1 Event-driven

Dans ce type, les capteurs ne transmettent leurs données que si un événement prédéfini est observé comme un changement brusque. Ainsi, le délai de la transmission est limité et la réception doit être assurée (des envois multiples sont à prévoir) (exemple : les applications de la surveillance).

II.4.4.2 Time-driven

La collecte de données se fait périodiquement d'une façon continue ou bien selon une certaine distribution déterministe ou probabiliste. Le processus d'envoi planifie les périodes du sommeil des capteurs qui ne participent pas (exemple : les applications de la météo).

II.4.5 Selon le mode de fonctionnement

II.4.5.1 Découverte

Permet aux nœuds de connaître des services et de s'auto-organiser pour accomplir leurs tâches.

II.4.5.2 Interrogation

Propager une requête sur le réseau pour un intérêt particulier.

II.4.5.3 Acheminement

C'est le service de communication qui permet d'acheminer les données vers la destination.

II.4.6 Selon paradigmes de communication

II.4.6.1 Node centric

Les communications se basent sur l'identification des nœuds participants.

II.4.6.2 Data centric

Les communications se basent sur les données à transmettre.

II.4.6.3 Position centric

Les communications se basent sur la position des nœuds.

II.5 Caractéristique d'un protocole de routage hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches mais tout d'abord quelques définitions s'imposent.

- **Clustering** : le clustering est une technique pour partitionner le réseau en groupes (Clusters), sachant que pour chaque groupe est désigné un leader (Cluster Head), ce dernier communique avec les membres de son groupe et peut être avec les Cluster Heads des autres groupes. De cette manière, l'opération de clustering contribue considérablement à l'économie d'énergie, à la réduction de la complexité des protocoles de routage, et à la résistance au facteur d'échelle, en plus de l'agrégation de données qui permet d'éliminer la redondance de données et de n'envoyer que les informations utiles [20].

- **Cluster Head** : nécessaire pour organiser l'activité des clusters, il représente le chef du groupe surnommé aussi le leader, ses tâches sont diverses tel que l'organisation de la communication inter-cluster et intra-cluster, l'agrégation de données, il est élu par les autres nœuds ou bien pré-assignés par le concepteur de réseau, il peut être ordinaire comme les autres nœuds ou bien doté de plus d'énergie [20].

- **Station de base** : elle se situe au niveau supérieur de la hiérarchie d'un réseau de capteur, elle fournit une connexion entre le réseau et l'utilisateur finale [20].

- **Election des Cluster Head** : le nœud Cluster Head consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le Cluster Head coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution d'énergie sur le réseau. Pour pallier à ce problème, une rotation de ce rôle de Cluster Head est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier [37].

- **Communication intra-cluster** : la communication entre nœuds Cluster Head et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts [36].

- **Communication inter-cluster** : les Cluster Heads communiquent avec la station de base directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des "Nœud Gateway". Ces nœuds peuvent être des CH ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la consommation en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalabilité du réseau [35].

II.6 L'objectif du routage hiérarchique pour les RCSF

L'objectif principal du routage hiérarchique est de maintenir efficacement la consommation d'énergie des 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 destination. La formation de clusters est généralement fondée sur la réserve d'énergie des capteurs et sur les capteurs qui sont à proximité de cluster-head [30, 31].

II.7 Protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF

II.7.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [35]

LEACH est un protocole de routage hiérarchique introduit par heinzelman et all. Ce protocole se base sur la clustérisations dynamique. Au départ, LEACH sélectionne au hasard quelques nœuds capteurs au tant que chefs de cluster et tourne ce rôle d'une manière uniforme pour répartir la charge entre les capteurs et prolonger la durée de vie du réseau. Dans [26], le pourcentage des nœuds capteurs qui doivent agir au tant que chefs de groupe

est égale à 5%, ces clusters agrègent les données transmises par ses membres et envoient ces données à la station de base, pour cette raison, les clusters head ont besoin plus d'énergie que les autres nœuds. L'opération de Leach est divisée en tours, ou chaque tour commence avec une phase d'installation suivie d'une phase de communication :

- **Phase d'installation**

Chaque capteur choisit lui-même d'être un chef de groupe avec une probabilité P qui est choisie en fonction du nombre de clusters K et du nombre de nœud capteurs N dans le réseau. De même pour les prochaines choix des itérations suivantes. Ce protocole vérifie si le nœud n'a été pas une tête de groupe dans les plus récents tours. Puis chaque capteur choisit un nombre aléatoire, r , entre 0 et 1. Si ce nombre aléatoire est inférieur à une valeur de seuil $T(n)$, le nœud devient un CH pour le cycle actuel.

Le seuil est défini comme suit :

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{p})} \quad (si \ n \in \ G)$$

Avec

- P : pourcentage désiré de CH.
- r : itération actuelle.
- G : ensemble des nœuds qui ont été sélectionnés comme CH durant les dernières $(1/P)$ itérations.

Une fois que les CH sont choisies, ils envoient un message d'annonce au reste des nœuds dans le réseau qu'ils sont les nouveaux chefs de cluster. Après avoir reçu cette annonce contenant l'ID du nœud et un en-tête qui distingue ce message d'annonce. Chaque nœuds non tête décident du groupe auquel ils veulent appartenir. Cette décision est basée sur l'intensité du signal d'annonce, puis il informe le CH qu'il appartient à son groupe, et cela ce fait par un message Join-REQ contenant l'ID du nœud et l'ID du CH. A la réception de tous les messages à partir des nœuds qui seraient certainement inclus dans le cluster, le CH crée une planification TDMA en attribuant pour chaque nœud une tranche de temps ou il peut transmettre. Ce calendrier sera diffusé à tous les nœuds du cluster.

- **Phase de communication**

Selon le calendrier désigné par le CH, les nœuds capteurs peuvent commencer la détection et la transmission de données à leur chef et ce dernier agrège ces données avant de les envoyer à la station de base.

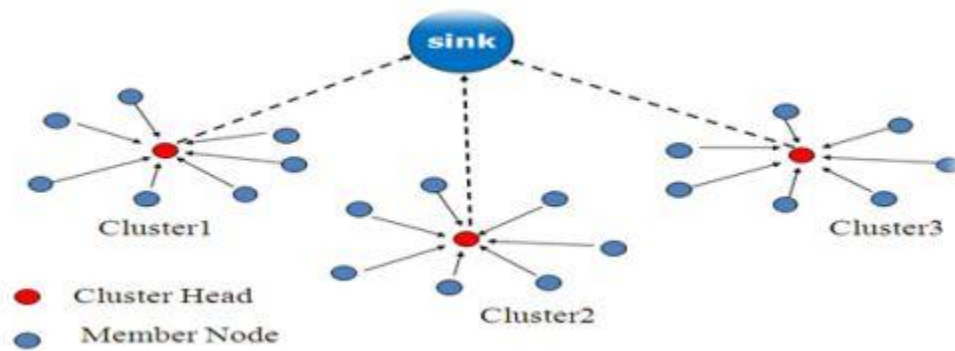


Figure II.4 : Algorithme de routage LEACH [34]

Les avantages

➤ La consommation d'énergie est partagée sur l'ensemble des nœuds prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

Les inconvénients

➤ Les CH les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.

II.7.2 LEACH-C (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Centralized)

[35]

LEACH-C est une variante de LEACH, a été conçue pour répondre au problème de sélection aléatoire du CH dans LEACH. Elle a été proposée par les mêmes auteurs de LEACH [25]. Cette variante utilise une architecture centralisée pour choisir les Cluster Head, la phase d'état stable de LEACH-C est comme suite :

- Lors de la phase d'installation de LEACH-C, les nœuds informent la station de base par l'envoi d'information sur leur position par GPS et leur niveau d'énergie.

- La station de base désigne les Cluster Head en se basent sur la moyenne des niveaux d'énergie, les nœuds ayant un niveau d'énergie inférieur à la moyenne ne peuvent pas être des Cluster Head dans l'itération courante.

- Enfin, la station de base diffuse un message contenant les identificateurs des Cluster Head.

- Le fonctionnement des autres opérations est similaire à celui de LEACH.

Les avantages

➤ LEACH-C permet une diminution remarquable de la consommation énergétique.

Les inconvénients

➤ La version centralisée n'est pas adaptée aux réseaux de grande dimension.

II.7.3 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Le protocole PEGASIS est un protocole base chaîne, proche de l'optimal. L'idée principale de PEGASIS est de former une chaîne entre les nœuds. Dans ce protocole, un nœud peut seulement communiquer avec son voisin le plus proche et doit attendre son tour pour pouvoir transmettre à la station de base. Le nœud capteur doit trouver son voisin le plus proche par l'envoi d'un signal et l'atténuation graduelle de ce dernier, jusqu'à ce qu'il soit reçu par un seul nœud. De ce fait la chaîne sera formée, elle doit contenir automatiquement des nœuds qui sont les plus proches les uns des autres, et qui forment un chemin vers la station de base.

Les données collectées sont transmises, et agrégées, d'un nœud à un autre jusqu'à ce qu'elles arrivent à un cluster-head. Ce dernier les transmet, à son tour, à la station de base. La sélection de ce cluster-head se base sur plusieurs paramètres prédéterminés, tel que le rapport (Signal)/(Bruit).

Le cluster-head élu demeure seulement pour une période de temps, ensuite dans la prochaine période, un autre nœud sera choisi pour un autre round [23, 28].

- Approche de construction de chaîne [33]

Les nœuds vont être organisés de sorte qu'ils forment une chaîne, qui peut être soit calculée d'une façon centralisée par la BS et émise à tous les nœuds, ou accomplie par les nœuds capteurs eux-mêmes en employant un algorithme avide (Greedy algorithme). Si la chaîne est calculée par les nœuds capteurs, ils peuvent d'abord obtenir toutes les données sur l'emplacement des nœuds capteurs et calculent localement la chaîne en utilisant le même algorithme avide. Puisque tous les nœuds ont les mêmes données d'emplacement et exécutent le même algorithme, ils vont tous produire le même résultat.

Pour construire la chaîne, PEGASIS commence avec le nœud le plus éloigné de la BS (choisir un nœud aléatoirement s'il y a une cravate). Le voisin le plus proche de ce nœud sera le nœud suivant dans la chaîne. Les voisins successifs sont sélectionnés de cette

manière parmi les nœuds non visités (avec une cravate brisée arbitrairement) afin de former la chaîne de nœuds.

L'algorithme commence par le nœud le plus lointain pour s'assurer que les nœuds les plus loin de la BS ont des voisins proches à mesure que, dans l'algorithme avide, les distances voisines augmenteront graduellement puisque des nœuds déjà présents sur la chaîne ne peuvent pas être revisités. La figure II.5 suivante montre le nœud 0 et le nœud 1 se connectant au nœud 3, le nœud 3 se connectant au nœud 1 et le nœud 1 se connectant au nœud 2. Lorsqu'un nœud meurt, la chaîne est construite de la même manière pour contourner le nœud mort.

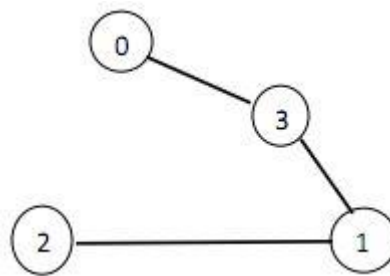


Figure II.5 : Construction de chaînes en utilisant l'algorithme avide [32].

Pour la collecte des données, chaque nœud reçoit les données d'un voisin, fusionne ses propres données et les transmet au nœud suivant de la chaîne. Dans un tour donné, une approche de passage de jeton simple est initiée par le leader pour démarrer la transmission de données à partir des extrémités de la chaîne. Ici, le coût est très inférieur car la taille du jeton est très faible. La figure suivante, montre le nœud C2 comme le leader. Il passe le jeton à C0. C0 envoie ses données à C1. C1 fusionne ses propres données avec les données de C0 et les envoie au leader C2. C2 transmet alors le jeton à C4. C4 envoie ses données à C3. C3 fusionne ses données avec les données de C4 puis les transmet au leader C2. C2 attend pour recevoir les données des deux voisins, puis il fusionne ses données avec les données du voisin. Le leader transmet alors un seul message à la BS [32].

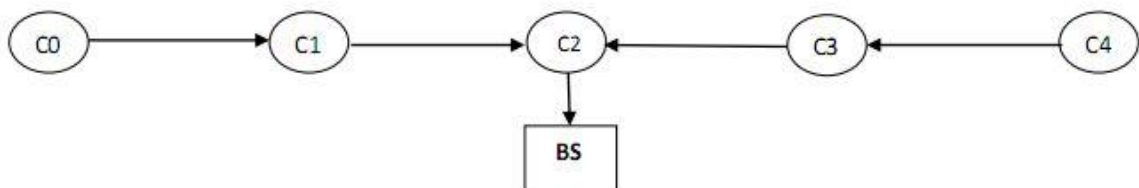


Figure II.6 : Le passage de jeton [32]

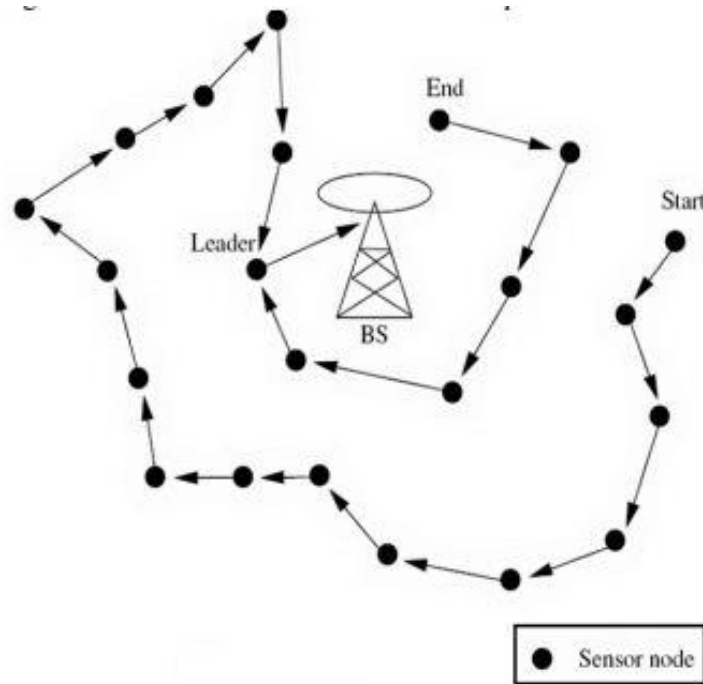


Figure II.7 : Illustration de protocole PEGASIS [33]

Les avantages

- Le changement régulier des cluster-heads par période diminue le risque de partitionnement du réseau.
- La communication entre les nœuds les plus proches réduit la bande passante.

Les inconvénients

- Le choix d'un seul nœud responsable de la communication avec la station de base à chaque période engendre des coûts supplémentaires en énergies.

II.7.4 HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed approach) [35]

Ossama Younis and Sonia Fahmy ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé HEED pour les réseaux de capteurs. Contrairement aux techniques précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité de modifier leur puissance de transmission. HEED sélectionne les cluster-heads selon un critère hybride regroupant l'énergie restante des nœuds et un second paramètre tel que le degré des nœuds. Il vise à réaliser une distribution uniforme des clusters chefs dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Un nœud est élu comme cluster head avec une probabilité P_{ch} égale à :

$$P_{ch} = \frac{C_{prob} \cdot E_n}{E_{total}}$$

Où :

- E_n est l'énergie restante du nœud n.
- E_{total} est l'énergie globale dans le réseau.
- C_{prob} est le nombre optimal de clusters.

Cependant, l'évaluation de E_{total} présente une certaine difficulté, à cause de l'absence de toute commande centrale. Un autre problème réside dans la détermination du nombre optimal de clusters. De plus, HEED ne précise pas de protocole particulier à utiliser pour la communication entre les clusters heads et le sink. A l'intérieur du cluster, le problème ne se pose pas car la communication entre les membres du cluster et le cluster Head est directe (à un saut). D'autre part, avec HEED, la topologie en clusters ne réalise pas de consommation minimale d'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas équilibrés en taille.

Les avantages

- HEED prolonge la durée de vie du réseau en distribuant l'énergie de la communication et le nombre de CH d'une façon uniforme et donc produire des clusters compact tout en minimisant la charge des messages de contrôle.
- HEED n'indique aucune supposition sur la distribution ou la densité des nœuds, ainsi que leurs capacités.

Les inconvénients

- Le fait que le choix des CH est une décision qui ne se base que sur des informations locales, des insuffisances dans la fonction du coût seront présentées telle le cas de la communication inter-clusters qui n'est pas prise en considération par cette fonction.
- Les clusters générés avec HEED ne sont pas tellement équilibrés en taille.

II.8 Tableau comparatif pour les protocoles de routage hiérarchique étudiés [35]

Pour comparer et analyser les différentes philosophies des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs sans fils, il est important d'utiliser des critères de classification appropriés pour pouvoir les distinguer. En effet la classification permet aux

concepteurs de mieux comprendre les caractéristiques de ces protocoles et de discerner les relations entre eux.

Protocoles /Critère	Mobilité	Agrégation de données	QOS	Scalabilité	Multi-saut	Couche MAC
LEACH	Non	Distribué	Non	Limité	Non	TDMA-CDMA
LEACH-C	Non	Distribué	Non	Limité	Non	TDMA-CDMA
PEGASIS	Non	Non	Non	Limité	Non	TDMA
HEED	Non	Centralisé	Non	Bonne	Non	TDMA

Tableau II.1 : Classification des protocoles de routage hiérarchique [35].

II.9 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons effectué une étude exhaustive de quelques protocoles et approches de routage pour les RCSF. L'analyse de ces protocoles nous a permis de mettre en relief les avantages et les inconvénients des techniques de routages adoptées par chacun d'eux.

Chapitre III

La recherche Coucou via vol de Lévy et la modélisation de l'algorithme proposé

Chapitre IV

Implémentation et discussion

IV.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons évaluer le nouveau protocole ECSBCP proposé en adaptant l'algorithme de Recherche Coucou pour bien minimiser la distance totale de transmission dans le réseau à l'aide de clustering ce qui réduirait aussi le nombre de transmission, et avec l'agrégation des données dans le RCSF par conséquent moins d'énergie consommé.

Les performances de notre protocole et leur efficacité dans la consommation énergétique sera comparé avec le célèbre protocole de routage LEACH.

IV.2 A propos de l'environnement MATLAB

Nous avons choisi MATLAB (MATrix LABoratory), comme un environnement d'implémentation pour notre protocole. MATLAB est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement des applications, la visualisation et l'analyse de données, ou encore le calcul numérique.

Nous utilisons MATLAB®11.0 pour résoudre des problèmes de calcul scientifique plus rapidement. Le langage MATLAB met à la disposition du développeur les opérations vectorielles et matricielles, fondamentales pour les problèmes d'ingénierie et scientifiques. Il permet un développement et une exécution rapide à l'égard de langage MATLAB nous pouvons programmer et tester des algorithmes plus rapidement qu'avec les langages traditionnels, car il n'est pas nécessaire d'effectuer les tâches de programmation de bas niveau, comme la déclaration des variables, la spécification des types de données et l'allocation de la mémoire.

Les IHM (Interface Homme Machine), sont appelés GUI (Graphique User Interfaces) dans MATLAB. Elles permettent à des objets graphique (boutons, menus, cases à cocher, ...) d'interagir avec un programme informatique [42].

L'environnement de MATLAB possède 4 fenêtres

- a. Au centre l'invite de commande (command window).
- b. En haut à droite le contenu de l'espace courant de travail (workspace).
- c. gauche la liste des fichiers du répertoire courant (currentfolder).
- d. En bas à droite l'historique des commandes tapées (command history)[43].

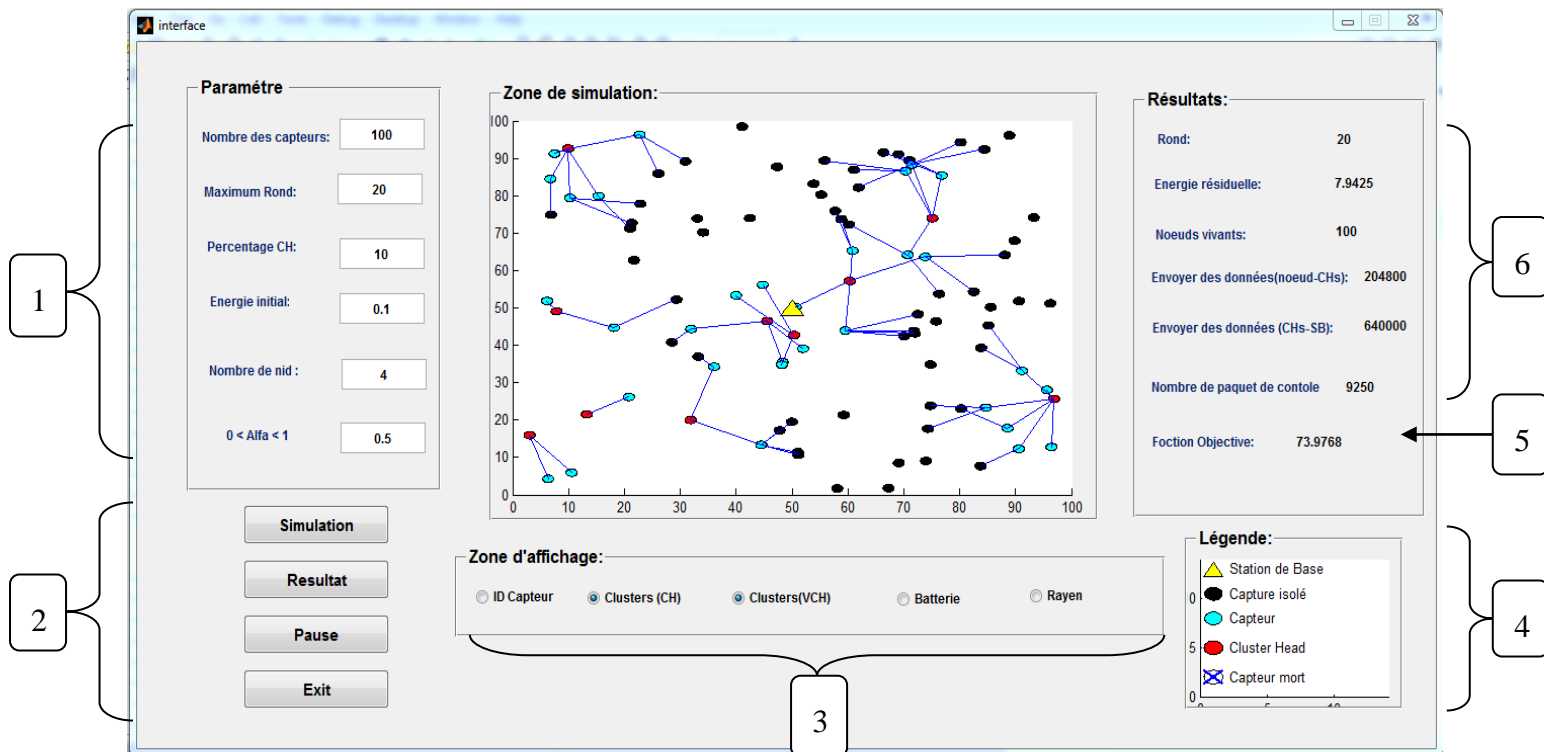
IV.3 Les étapes d'exécution de l'application

IV.3.1 Lancement d'application

IV.3.2 Description et paramètres de simulation

Pour l'implémentation de mise en œuvre de notre algorithme proposé, nous avons conçu un simulateur d'un RCSF avec une interface conviviale. Il y'a plusieurs paramètres dont nous avons besoin et qui conduisent a bien adapter la configuration de réseau et l'algorithme proposé par rapport au l'objectif de notre travail.

La première interface présentée est l'interface principale de l'application :



FigureIV.1 : Interface de simulation

1 : Zone des paramètres initiaux : détermine les paramètres initiaux du réseau et les paramètres d'ECSBCP.

2 : Zone de contrôle de simulation :

- Bouton de simulation : Pour commencer la simulation.
- Résultat : pour afficher le résultat.
- Pause : pour arrêter la simulation à n'importe quel instant.
- Exit : pour sortir de l'application.

3 : Zone d'affichage : l'affichage des caractéristiques des nœuds.

4 : Légende.

5 : Résultat de la fonction objective.

6 : Zone de résultat : le nombre des données transmises dans le réseau, l'énergie résiduelle et le nombre des nœuds vivant.

La deuxième interface présentée est l'interface de résultats de simulation :

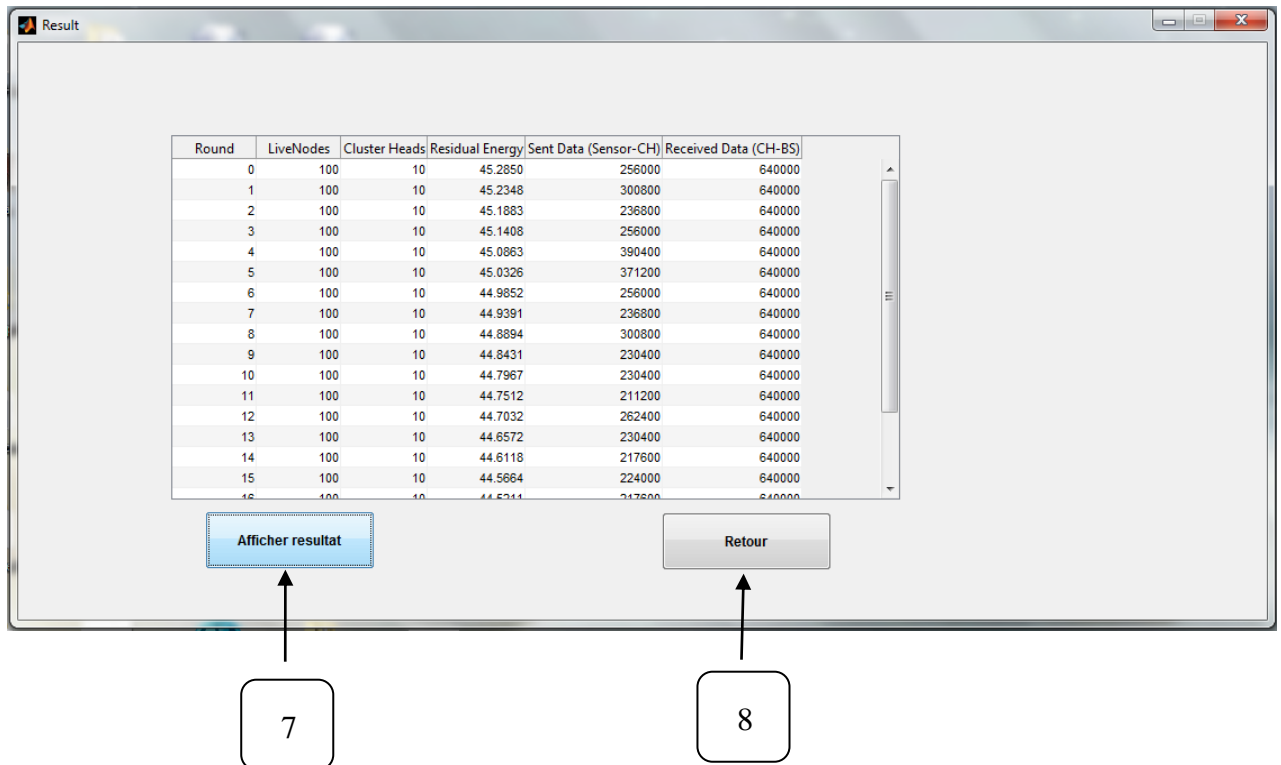


Figure IV.2 : Les résultats de simulation.

7 : Pour afficher le résultat de simulation.

8 : Pour retourner à l'interface de simulation.

IV.4 Paramètres de simulation

IV.4.1 Energie de capture

Un capteur utilise son énergie pour réaliser trois actions principales : l'acquisition, la communication et le traitement des données.

- a) **Acquisition** : L'énergie consommée pour effectuer l'acquisition n'est pas très importante. Néanmoins, elle varie en fonction du phénomène et du type de surveillance effectué.

b) Communication : Les communications consomment beaucoup plus d'énergie que les autres tâches. Elles couvrent les communications en émission et en réception. La figure IV.3 présente un modèle d'antenne et les règles de consommation d'énergie associées [43].

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

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX}(1) + E_{TX_amp}(k, d) \tag{1}$$

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} k \cdot E_{elec}(k, d) + k \cdot \epsilon_{friss} \cdot d^2 & \text{si } d < d_{crossover} \\ k \cdot E_{elec}(k, d) + k \cdot \epsilon_{row_ray_amp} \cdot d^2 & \text{sinon} \end{cases} \tag{2}$$

Pour recevoir un message de k bits, le récepteur consomme :

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx_elec}(k) = k \cdot E_{elec} \tag{3}$$

Avec

E_{elec} : Energie de transmission/réception électronique ;

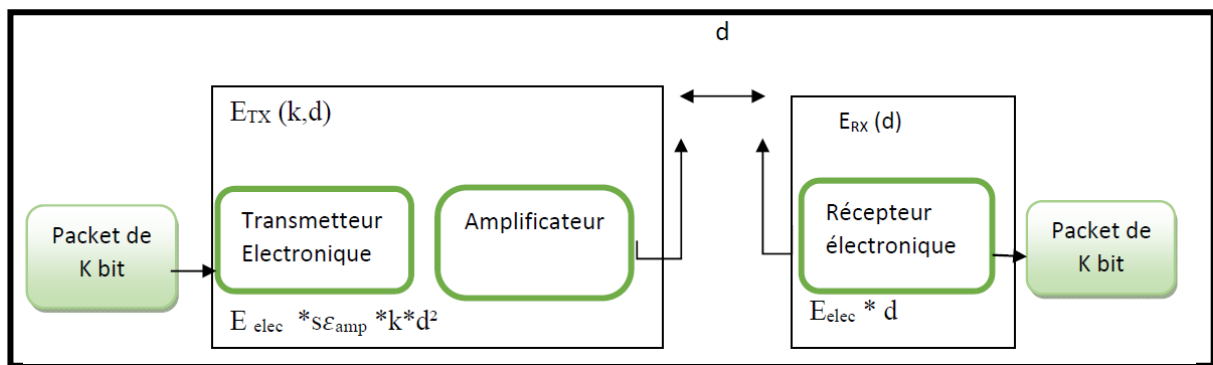
k : Taille d'un message ;

d : Distance entre l'émetteur et le récepteur ;

E_{TX-amp} : Energie d'amplification ;

ϵ_{amp} : Facteur d'amplification ;

$d_{crossover}$: Distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.



FigureIV.3 : Modèle de consommation d'énergie

c) Traitement des données : L'énergie consommée pour les opérations de calculs est beaucoup plus faible que l'énergie de communication. Un exemple est cité dans [43]. L'énergie nécessaire pour transmettre 1 KB sur une distance de 100m est approximativement équivalente à l'énergie nécessaire pour exécuter 3 millions

d'instructions avec une vitesse de 100 millions d'instructions par seconde (MIPS). Ce niveau peut être dépassé en fonction des circuits installés dans les nœuds et des fonctionnalités requises.

Par la suite, elle sera calculée en appliquant la formule suivante :

$$E_{DA} = 5 \text{ nJ/bit/signal}$$

IV.5 Simulation et résultats

Les résultats de simulation que nous avons obtenus seront présentés dans cette partie, ces résultats seront comparés avec celles obtenus par le protocole LEACH.

L'évaluation de notre protocole ce fait en terme d'économie d'énergie, de prolongation de la durée de vie global du réseau et le nombre total des nœuds vivants dont on analysant les résultats fournis.

Nos paramètres de simulation sont les mêmes que LEACH et nous assumons que tous les nœuds ont une position fixe durant toute la période de simulation et la station de base est positionnée au centre de la zone du captage.

IV.5.1 Mesure de performance

- **Durée de vie du réseau** : L'intervalle de temps à partir du début du simulation jusqu'à la mort du dernier nœud capteur.
- **Période de stabilité** : L'intervalle de temps entre le début du fonctionnement du réseau jusqu'à la mort du premier capteur.
- **Période d'instabilité** : L'intervalle de temps entre la mort du premier capteur jusqu'à la mort du dernier capteur.
- **Premier nœud mort (FDN)** : Nombre de ronds après lesquels le premier capteur est mort.
- **Demi-nœuds morts (HDN)** : Nombre de ronds après lequel la moitié des nœuds de capteurs sont morts.
- **Dernier nœud mort (LDN)** : Nombre de ronds après lesquels tous les nœuds capteur sont morts.

Paramètres	Scenario
Protocole	ECSBCP, LEACH
Nombre de nœuds	100
Zone de simulation	100x100m
L'énergie initiale des nœuds	0.1j
Taille de paquet	6400 bit
Eelec	50 nJ/bit
Efs	10 pJ/bit/m ²
Emp	0.0013 pJ/bit/m ²
Eda	5pJ/bit/sig
Type de distribution	Aléatoire
Mobilité	-

Tableau IV.1 : Les paramètres de simulation

Paramètre de l'algorithme CS	Valeur proposé
Nombre de nids	5
α, β de la fonction objective	0.5

Tableau IV.2 : Les paramètres de l'algorithme CS

Le tableau IV.3, montre l'énergie résiduelle par rapport chaque rond pour le protocole LEACH et le protocole ECSBCP avec 5, 50 et 100 nids.

Round	ECSBCP nid 5	Leach	ECSBCP nid 80	ECSBCP nid 100
1	9,057	9,057	9,057	9,057
50	6,774628	5,357508	6,762224	6,827523
100	4,465689	1,583471	4,438842	4,600538
150	2,145995	0,004276	2,270015	2,617522
200	0,282039	/	0,636072	0,900535
239	0,00019	/	0,010486	0,081067
250	/	/	0,001509	0,008523

Le tableau IV.3 : la consommation énergétique après 250 ronds.

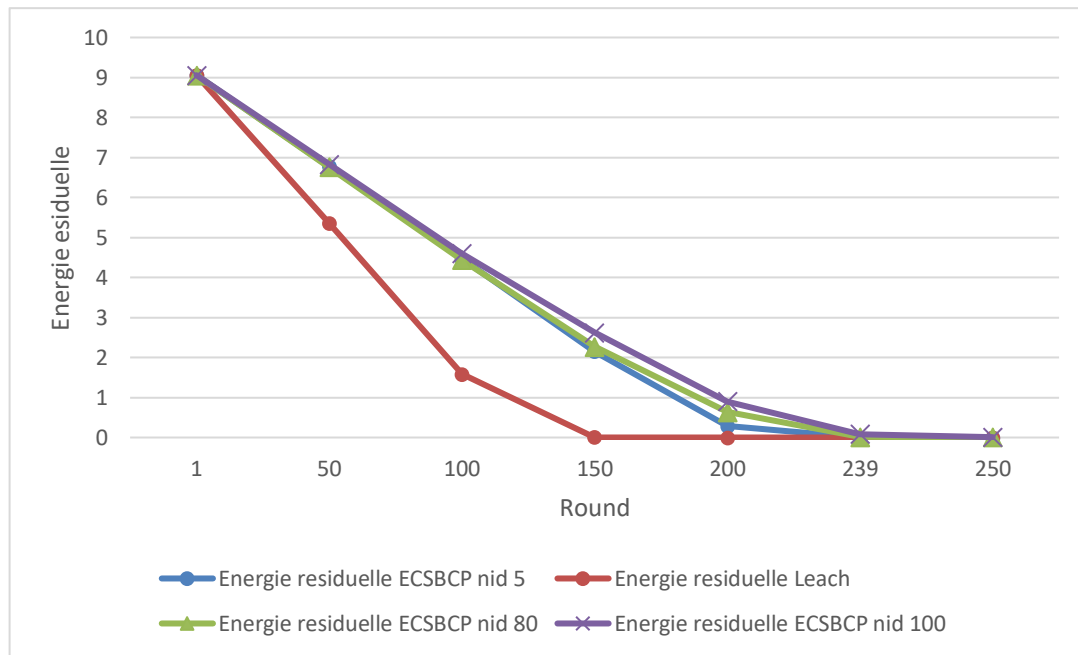


Figure VI.4 : la consommation d'énergie après 250 ronds.

On remarque qu'après chaque rond, l'énergie se diminue pour les deux protocoles LEACH et ECSBCP avec 5, 80 et 100 nids. Cependant, en utilisant notre nouveau protocole ECSBCP proposé, le réseau réserve mieux son énergie et par conséquent prolonge sa durée de vie et les nœuds restent vivants au minimum jusqu'à le 239^{ème} ronds. Par contre dans le protocole LEACH l'énergie de réseaux est consommée entièrement à l'environ de 200^{ème} rond. Cette amélioration apportée par notre protocole est grâce à l'utilisation de l'algorithme de Recherche Coucou pour le choix optimal des positions des CH. Cette optimisation est basée sur une fonction objective qui prend en considération la maximisation de l'énergie totale de réseau et la minimisation de la communication intra-cluster et la communication entre les CH et la station de base.

Le tableau IV.4 montre les résultats de notre algorithme en termes de nœuds vivants pour les protocoles LEACH et ECSBCP.

Round	Nœud vivant ECSBCP	Nœud vivant LEACH
1	100	100
50	100	100
100	100	89
150	99	1
200	41	0
240	1	0

Le tableau IV.4 : Le nombre des nœuds vivants dans quelque rond.

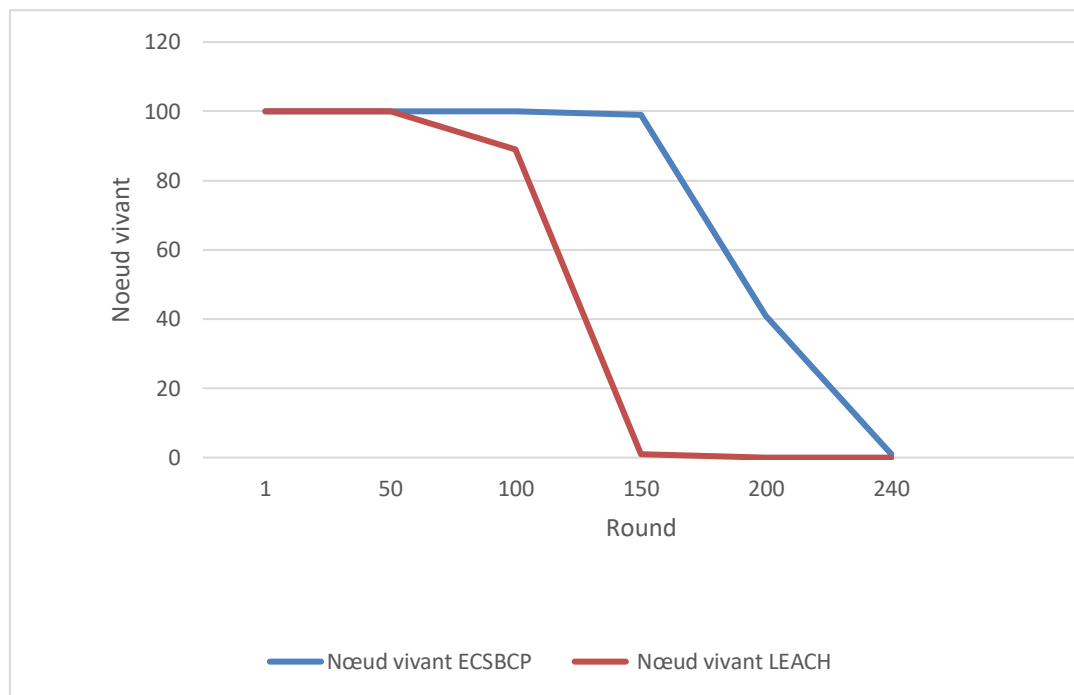


Figure VI.5 : Nombre des nœuds vivants.

D'après le graphe au-dessus, on peut constater que le nombre des nœuds vivants diminue avec l'évolution des ronds pour les deux protocoles LEACH et ECSBCP. Mais pour notre protocole ECSBCP il reste des nœuds vivant jusqu'à le 240^{ème} ronds contrairement au LEACH dont les nœuds sont totalement mort après le 200^{ème} ronds. Cela due à la distribution optimal des CH, l'affectation équilibré des membres à leurs CH et aussi l'utilisation de technique de routage à deux-sauts pour les nœuds isolés ce qui leurs permettent de préservé au mieux leurs énergie.

Le tableau IV.5 montre les résultats obtenus en termes du premier nœud mort, demi-nœuds morts et derniers nœuds morts selon les deux protocoles LEACH et notre protocole ECSBCP avec 5 et 50 nids par apport à chaque rond.

	ECSBCP nid 5	ECSBCP nid 50	LEACH
FDN	132	153	80
HDN	197	207	134
LDN	240	244	173

Le tableau IV.5 : Les ronds relatif au premier nœud mort, demi-nœuds morts et derniers nœuds morts.

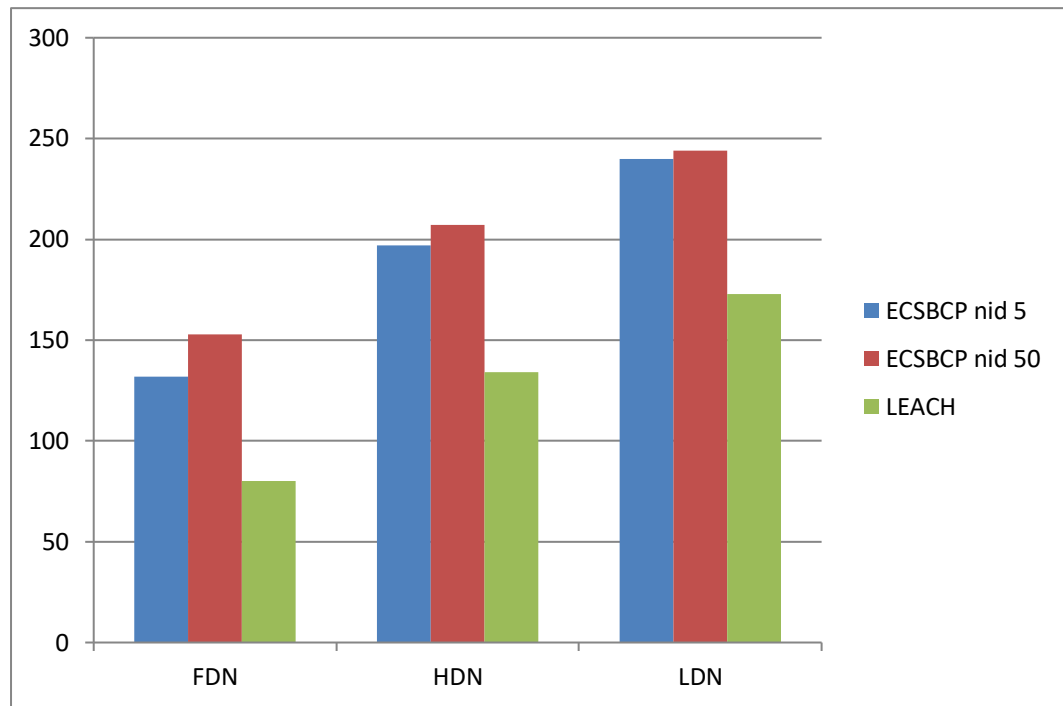


Figure VI.6 : Les ronds relatif au premier nœud mort, demi-nœuds morts et derniers nœuds morts.

On remarque dans ce graphe que le protocole ECSBCP avec 50 nids surpasse les autres protocoles (LEACH, ECSBCP avec 5 nids) en termes de période de stabilité **FDN** et même pour le période d'instabilité **HDN** et **LDN**.

D'où, nous pouvons constater que, en termes d'optimisation de la durée de vie du réseau, notre protocole ECSBCP est toujours plus performant que LEACH et la durée de vie du réseau augmente proportionnellement au nombre de nids.

Le tableau IV.6 montre les résultats de notre algorithme en termes de nombre de paquets reçu par la station de base selon les protocoles LEACH et ECSBCP.

Round	Paquet reçu ECSBCP	Paquet reçu LEACH
1	640000	640000
50	640000	640000
100	640000	569600
150	640000	6400
200	582400	0
250	6400	0

Le tableau IV.6 : Le nombre paquets reçu par la station de base dans certain rond.

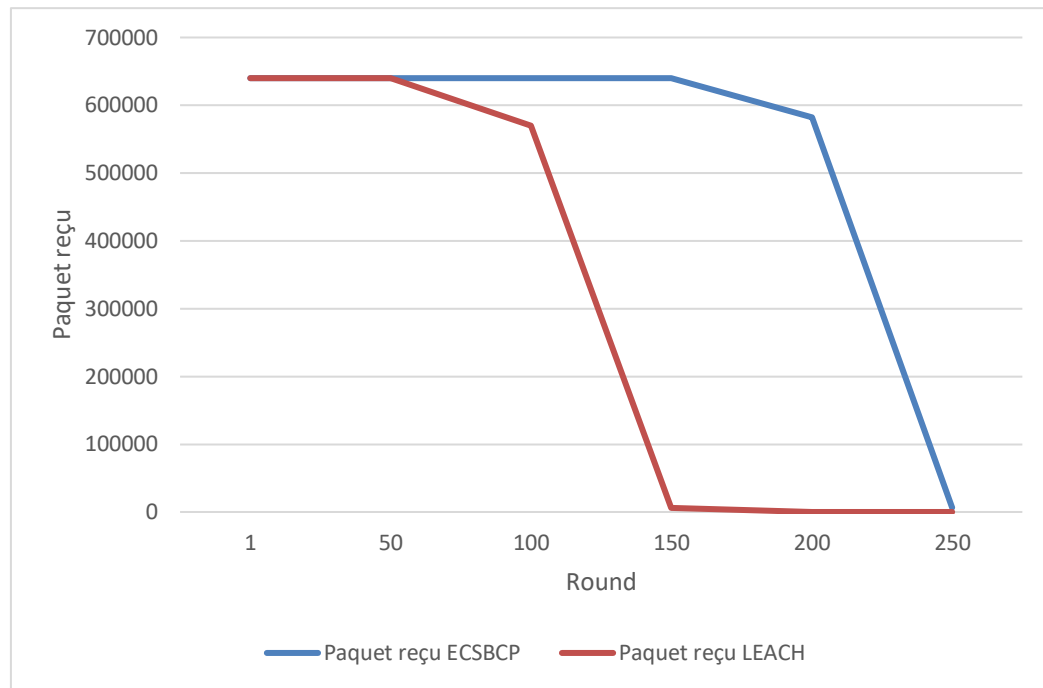


Figure VI.7: Nombre de paquet reçu par la station de base.

D'après le graphe au-dessus il est clair que pour les deux protocoles (LEACH, ECSBCP) la transmission des données entre (CH-BS) diminuent avec l'évolution des nombres des ronds. Dans le LEACH la transmission est arrêtée après la 150^{ème} rond par contre, dans notre protocole ECSBCP les données sont envoyées au BS jusqu'à la 250^{ème} rond. Cette amélioration est due à la capacité de notre protocole proposé dans la collecte des données auprès les nœuds isolés efficacement via leur vice-cluster correspondant (VCH) et à l'extension de la durée de vie du réseau qui a été fournie.

Le tableau IV.7 montre les résultats de notre algorithme en termes de nombre de paquets de contrôle selon les protocoles LEACH et ECSBCP.

Rond	ECSBCP	LEACH
1	630	0
20	8839	3192
50	20737	11326
70	28824	16737
100	40316	24678,57
130	50213	29319,2
150	52516	29839,62
170	54520	/
200	57411	/
230	59581	/
250	59922	/

Le tableau IV.7 : Le nombre paquets de contrôle dans certain ronds.

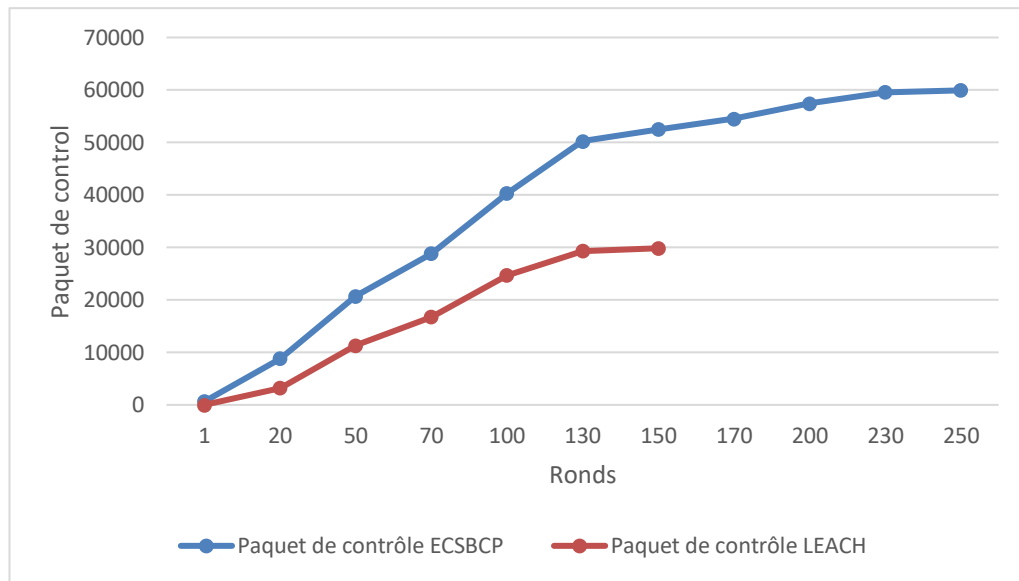


Figure IV.8 : Le nombre paquets de contrôle.

D'après le graphe au-dessus, il est clair que notre protocole proposé ECSBCP utilise un nombre important de paquets de contrôle en le comparant au protocole LEACH. L'algorithme de recherche coucou s'exécute au niveau du station de base (centralisé) ce qui nécessite énormément de communication entre la BS et les nœuds pour la sélection dynamique des CH. En plus, la formation des clusters et le choix des Vive-CH utilisent aussi des paquets de contrôle.

IV.5.2 Discussion et résultats

Après avoir comparé les performances des deux protocoles LEACH et ECSBCP, nous avons remarqué que notre protocole proposé présente plusieurs avantages notamment dans la consommation d'énergie, l'augmentation des données reçues par la Station de Base, un réseau avec une durée de vie plus longue et une bonne distribution des CH. ces avantages sont grâce à l'algorithme de Recherche Coucou inspiré de la nature et adapté pour être utilisé dans la sélection optimale des CH et l'utilisation de technique de routage à deux-sauts pour les nœuds isolés. Cependant, LEACH présente une variation énorme dans le nombre des CH par rond, cela conduit à une mauvaise distribution des CH sur le réseau qui conduit à l'apparition des nœuds isolés qui envoient leurs données directement à la station de base. Ce type de communication directe entre le nœud isolé et la station de base provoque une forte consommation d'énergie qui affecte la durée de vie globale du réseau.

IV.6 Conclusion

Les résultats obtenus après différents tests confirment l'efficacité de notre protocole ECSBCP qui permet de retrouver rapidement des solutions optimales. Ces résultats confirment bien la validité de l'algorithme CS, sa simplicité d'implémentation lui donne un avantage conséquent.

Après avoir implémenté et simulé les deux protocoles LEACH et notre protocole proposé ECSBCP, nous avons démontré que ce dernier apporte beaucoup d'amélioration en termes de la conservation d'énergie, la quantité de données transmises à la station de base et la durée de vie de réseaux.

Conclusion générale

L'utilisation des batteries par les capteurs est une contrainte critique dans les réseaux de capteurs. Aussi les capteurs sont parfois déployés sans surveillance et en grand nombre, de sorte qu'il est difficile de changer ou de recharger leurs batteries. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil doivent minimiser la consommation d'énergie. Mais le taux de consommation énergétique des capteurs reste très variable selon les protocoles utilisés.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons proposé des solutions permettant d'offrir une meilleure prise en compte des ressources énergétiques du réseau.

Nous avons implémenté et simulé le fonctionnement de protocole ECSBCP et le comparé avec un autres protocole de la littérature à savoir LEACH, afin de montrer ses performance en termes de consommation énergétique et la quantité de données envoyées à la station de base. Les simulations ont montré des bons résultats, une consommation énergétique très réduite par conséquent, une prolongation remarquable de la durée de vie des réseaux.

Comme une perspective, et pour améliorer les résultats obtenus, nous envisageons par la suite les perspectives suivantes :

- ✓ Une version multi-sauts (inter CH) de notre protocole a fin de minimisé la distance de transmission.
- ✓ Une hybridation entre l'algorithme de recherche cuckoo avec d'autre méta-heuristique de la littérature.
- ✓ Une version décentralisée de ce même protocole pour réduire le nombre important des paquets de contrôle.
- ✓ La simulation du protocole proposé sur un simulateur dédié aux RCSF comme NS2, OMNET++, ...etc.

Références bibliographiques

- [1] F. Brissaud, D. Charpentier, A. Barroset C. Bérenguer, « capteurs intelligents : nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sureté de fonctionnement », Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon, France (2008).
- [2] Vernon S. Somerset, “Intelligent and Biosensors, Edited by Vernon S.Somerset”, Intech, January 2010
- [3] Akyildiz, I.F.,W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "A Survey onSensor Networks", IEEE Communications Magazine, August,102-114(2002).
- [4] A. Montoya, D. C. Restrepoet D.A. Ovalle, "Artificial Intelligence for WirelessSensor NetworksEnhancement”,InTech,2010.
- [5] QinghuaWanget IlangkoBalasingham,”Wireless Sensor Networks – An Introduction” Wireless SensorNetworks: Application-Centric Design, Geoff V Merrettand Yen Kheng Tan (Ed.), ISBN: 978-953-307-321-7, InTech,2010.
- [6] Ben L. Titzeret J. Palsberg, “NonintrusivePrecision Instrumentation of Microcontroller Software” , ACM, New York, NY, ETATS-UNIS , Volume 40 Issue7,Pages 59 – 68, July 2005.
- [7] H. Karl et A. Willig, “Protocols and Architectures for Wireless SensorNetworks”, John Wiley& Sons, 2005.
- [8] B. Krishnamachari, “Networking Wireless Sensors”, Cambridge UniversityPress,2005.
- [9] Tinyos. <http://www.tinyos.net/>, 2010.
- [10] Dunkels, A., B. Grönvall, et T. Voigt. Contiki:aLightweight and Flexible Operating System for TinyNetworkedSensors. In Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded NetworkedSensors, pages 455-462, Tampa, Florida, USA, 2004.
- [11] <http://www.btnode.ethz.ch/Projects/SensorNetworkMuseum>.
- [12] M. Badet, W. Bonneau. ”Mise en place d’une plateforme de test et d’expérimentation“, Projettutoré (1^{ière} Master Technologie de l’Internet), Mémoire de Master, Université Pau et des pays de l’Adour, 2006.
- [14] Intanagonwiwat. C, Govindan. R, Estrin. D, ”DirectedDiffusion:ascalable and robust communication paradigm for sensor networks“, ACM Press, 2000.
- [15] Xue Yong, Gonzalez Andres, Aguilar Andres, Barroux Mickaël, “Agrégation de données dans les réseaux de capteurs”, Rapport de Projet SR04, Université de Technologie

Compiègne, Automne 2010.

[16] http://www.mesurex.fr/generalites_sur_les_capteurs.php (consulté le 03 mai 2018)

[17] David Martins, "Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil Stéganographie et réseaux de confiance", L'U.F.R. des Sciences et Techniques de l'université de Franche-Comté, 2010.

[18] M. LEHSAINI, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen et Université de Franche-Comté, 2009.

[19] MAAROUF Samia, OUADAH Souhila, "Implémentation et évaluation des schémas de routage sur une plateforme réelle de réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique option Réseaux et systèmes distribués, Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen, 25 Juin 2014.

[20] Ameer Ahmed Abbasi and Mohamed Younis. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer communications*, 30(14) :2826-2841, 2007.

[21] M. Djoudi et T. Mboukema A. Fares. Optimisation par colonie de fourmis. 2006.

[22] Jamal N Al-Karaki and Ahmed E Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless communications, IEEE*, 11(6) :6-28, 2004.

[23] Kamal Beydoun. Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. PhDthesis, Université de Franche-Comté, 2009.

[24] Mickael Cartron. Vers une plate-forme e-cace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. PhDthesis, 2006.

[25] Wendi B Heinzelman, Anantha P Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. An Application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 1(4) :660-670, 2002.

[26] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *System sciences*, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on, pages 10pp. IEEE, 2000.

[27] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, and Stephen Wicker. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks. In *IEEE infocom*, volume 2, pages 39 - 44, 2002.

[28] Stephanie Lindsey and Cauligi S Raghavendra. PEGASIS : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Aerospace conference proceedings*, 2002. IEEE.

[29] Zitouni Rafik. Mémoire de magistère : Routage à basse consommation d'énergie dans

les réseaux de capteurs sans fils. 2005.

[30] K. Akkaya, and M. Younis, “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”. *Journal of Ad Hoc Networks*, Vol. 3, No. 3, May 2005, pp. 325-349.

[31] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, “Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless Communications*”. IEEE, Décembre 2004.

[32] vol .142 IFSA, SENSORS & TRANSDUCERS , ‘sensor network and wireless sensor Network ’ , Volume 142, Issue 7, July 2012.

[33] Boubiche Djallel Eddine, Azeddine, Bilami , Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat, Université El Hadj Lakhdar de Batna 2008

[34] Boubiche Djallel Eddine, protocole de routage pour les réseaux de capteur sans fils. Mémoire de magistère en informatique Option: Informatique Industrielles l’année 2008

[35] BELLAL Juba, MOUSSAOUI Adel, ‘Routage Hiérarchique avec Optimisation de Consommation d’Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil’, Mémoire pour L’obtention du Diplôme Master Professionnelle En Informatique option Administration et Sécurité des Réseaux. Université de Bejaia 2015/2016

[36] My T Thai, Feng Wang, David Hongwei Du, and Xiaohua Jia. Coverage problems in wireless sensor networks : designs and analysis. *International Journal of Sensor Networks*, 3(3) :191-200, 2008.

[37] Adallah Makhoul. Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données, Université de Franche-Comté (LIFC). thèses de Doctorat, l’année 2008.

[38] Aziz OUAARAB. Résolution de Problèmes d’Optimisation Combinatoire par des Métaheuristiques Inspirées de la Nature : Recherche du Coucou via les Vols de Lévy. Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ MOHAMMED V FACULTÉ DES SCIENCES Rabat – Maroc. L’année 2015.

[39] Philippe FEYEL. Optimisation des correcteurs par les métaheuristiques – Application à la stabilisation inertielle de ligne de visée. Thèse de doctorat. ECOLE DOCTORALE STITS « Sciences et Technologies de l’Information des Télécommunications et des Systèmes », Laboratoire des Signaux et Systèmes. L’année 2015.

[40] YANG X.S., DEB S, « Cuckoo Search Via Levy Flight », Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, India. IEEE Publications, p.210-214, USA, Décembre.2009.

[41] Lalita Yadav, Ch. Sunitha, “Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy in Wireless Sensor Network (LEACH)”, *International Journal of Computer Science and Information*

Technologies, Vol. 5 (3), 2014.

[42] V. Kawadia and P. R. Kumar, "Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks", IEEEINFOCOM. (2003).

[43] T. Kwon and M. Gerla, "Clustering with Power Control", In Proceedings MILCOM '99, volume 2. (1999).

[44] M. BOUDAA Okba, "Conception et réalisation d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil.", Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa.

[45] I.F. Akyildiz, et al. "Wireless sensor networks : a survey. Computer Networks (Elsevier) ", vol.38, no.4, March 2000, pp.393- 422.

[46] http://www.univ-tebessa.dz/fichiers/master/master_2253.pdf (consulté le 03 mai 2018)

[47] D.E. BOUBICHE, Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil, Pour l'obtention du diplôme de Magister en Informatique, Université de l'Hadj Lakhdar-Batna, 2008.