

République Algérienne Démocratique Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira De Bejaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Informatique
Option : Administration et Sécurité des Réseaux

Thème

**Routage avec optimisation de la consommation
d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil**

Réalisé par :

M^{elle} AMOKRANE Fatma

Devant le jury composé de :

Président : M^r SAADI Moustapha « Maitre-assistant U.Béjaïa »

Encadreur : M^r AMAD Mourad « Maitre de conférences U.Bejaïa »

Examineur : M^r BAADACHE Abderahmane « Maitre de conférences U.Bejaïa »

Examineur : M^r NAFI Mouhamed « Maitre-assistant U.Béjaïa »

Juin 2016

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la patience et la volonté pour la réalisation de ce travail.

*Au terme de la rédaction de ce mémoire, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadreur Monsieur **Amad Mourad** pour ses orientations, ses encouragements, sa disponibilité et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Aussi je tiens à lui reconnaître le temps précieux qu'il m'a consacré.*

Mes vifs remerciements sont adressés aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Baadache Abderrahmane** et Monsieur **Saadi Moustapha** pour leurs orientations, leurs gentillesse et leurs générosités et aussi aux enseignants qui m'ont assisté durant tout le cursus universitaire.*

Enfin je remercie toute ma famille et mes amies pour leurs soutiens et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

*A cœur vaillant rien d'impossible
A conscience tranquille tout est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessein
Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent
En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout
Notre unique et seul atout
Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance
Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal
Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal
Espérant des lendemains épiques
Un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri
Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,
Nous prions dieu que cette soutenance
Fera signe de persévérance
Et que nous serions enchantés
Par notre travail honoré*



Je dédie ce travail ...

A mes très chers parents

A mes très chers frères

A ma très chère tante

A mes chers oncles et leurs femmes

A mon cher grand père

A ma chère grande mère

A la mémoire de mes chers grands parents

A mes chers cousins et cousines

A toutes mes amies

Table des matières

Table des figures	v
Liste des tableaux	vi
Liste des algorithmes	vii
Liste des acronymes	viii
Résumé	x
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation des réseaux de capteurs	4
1.2.1 Définition d'un capteur	4
1.2.2 Définition d'un réseau de capteurs	4
1.3 Architecture des réseaux de capteurs	5
1.3.1 Architecture d'un capteur	5
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteur	6
1.4 Classification des réseaux de capteurs	7
1.4.1 Mode d'acquisition et de livraison des données au puits	7
1.4.2 Selon la distance entre les nœuds capteurs et le puits	8
1.4.3 Selon le modèle de mobilité dans le réseau	8
1.4.4 Selon les capacités des nœuds du réseau	9
1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs	9
1.6 Domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil	10
1.7 Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF	12
1.7.1 Contraintes conceptuelles	12
1.7.2 Contraintes matérielles	13
1.8 Communication dans les réseaux de capteurs	14
1.8.1 Pile protocolaire	14
1.9 Consommation d'énergie dans les RCSF	15
1.9.1 Les principales opérations dues à la consommation d'énergie	15
1.9.2 Modèle de consommation d'énergie	16
1.10 Conclusion	17

2	 Routage dans les réseaux de capteur sans fil	18
2.1	Introduction	18
2.2	Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs	19
2.2.1	Classification selon la structure du réseau	19
2.2.2	Classification selon le fonctionnement des protocoles	22
2.2.3	Routage selon l'établissement de la route	23
2.2.4	Routage selon l'initiateur de communication	24
2.3	Quelques protocoles de routage à basse consommation d'énergie dans les RCSF	25
2.3.1	Flooding (Inondation)	25
2.3.2	Gossiping	26
2.3.3	SPIN (Sensor Protocols for Information via Negatiation)	27
2.3.4	LEACH (Law Energy Adaptive Hierarchy)	28
2.3.5	PEGASIS (Power -Efficient GATHERing in Sensor Information System)	29
2.3.6	MFR (Most Forward Within Radius)	29
2.3.7	Diffusion Dirigée (DD : Directed Diffusion)	30
2.4	Synthèse des protocoles de routage dans les RCSFs	31
2.5	Conclusion	31
3	 Etat de l'art sur les protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs	33
3.1	Introduction	33
3.2	Caractéristiques d'un protocole de routage hiérarchique	33
3.2.1	Algorithmes de clustering utilisés	34
3.2.2	Réélection des Clusters Head (CH)	34
3.2.3	Nature des clusters générés	35
3.2.4	Communication intra-cluster	35
3.2.5	Communication inter-cluster	35
3.2.6	Niveau d'agrégation des données	35
3.3	Protocoles de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil	36
3.3.1	EERFC (Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster Based Wireless Sensor Networks)	36
3.3.2	CSOS (Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks)	36
3.3.3	EECS (Energy Efficient Clustering Scheme in WSN)	37
3.3.4	TEEN (Threshild-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)	38
3.3.5	APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)	39

3.3.6	HEED (A Hybride Energy -Efficient Distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks)	39
3.3.7	DECSA (Distance-Energy Cluster Structure Algorithm) . . .	41
3.3.8	ECBDA (Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks)	42
3.4	Tableau comparatif pour les protocoles de clustering	45
3.5	Conclusion	45
4	Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)	46
4.1	Introduction	46
4.2	Description du protocole	47
4.2.1	Motivation	47
4.2.2	Hypothèses	48
4.2.3	Principe de fonctionnement	48
4.3	Conclusion	57
5	Evaluation des performances du protocole LZHREP	58
5.1	Introduction	58
5.2	Aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs	58
5.2.1	NS2 (Network Simulateur)	58
5.2.2	OPNET (Optimum NETWORK Performance)	59
5.2.3	OMNeT++ (Objective Modular Network Test-bed in C++)	59
5.3	Environnement de simulation	59
5.3.1	Matlab	59
5.3.2	Paramètres de simulation	60
5.3.3	Description du système	60
5.3.4	Variables descriptives du système	60
5.4	Evaluation des performances	61
5.4.1	Distribution des nœuds	61
5.4.2	Sélection des Faux Clusters Head et les Clusters Head	62
5.4.3	Energie restante après la sélection des Clusters Head	63
5.4.4	Energie moyenne restante de chaque capteur après l'envoi de 400 paquets	64
5.4.5	Somme moyenne d'énergie consommée en termes d'envoi paquets	66
5.4.6	Nombre de nœuds défailants et ceux qui sont en vie en terme de paquets envoyés	66
5.5	Conclusion	68
	Conclusion générale et perspectives	69
	Bibliographie	71

Table des figures

1.1	Rôle d'un capteur.	4
1.2	Composants d'un nœud capteur.	6
1.3	Architecture d'un réseau de capteur sans fil.	7
1.4	Quelques applications des RCSF.	12
1.5	Pile protocolaire dans les RCSFs.	14
1.6	Modèle de consommation d'énergie.	17
2.1	Différentes approches de routage dans les RCSFs	19
2.2	Topologie plate.	20
2.3	Architecture hiérarchique.	21
2.4	problème d'implosion.	25
2.5	Problème de chevauchement.	26
2.6	Fonctionnement du protocole de Gossiping.	27
2.7	Fonctionnement du protocole SPIN	28
2.8	Architecture en clusters dans le protocole LEACH [26].	29
2.9	Fonctionnement du protocole MFR.	30
2.10	Fonctionnement du protocole DD.	31
4.1	Formation des niveaux.	50
4.2	Formation des clusters.	51
4.3	Communication intra-cluster.	54
4.4	Communication inter-cluster.	55
5.1	Visualisation de la topologie du réseau.	62
5.2	Visualisation du réseau après la sélection des FCHs et CHs.	62
5.3	LZHREP : energie des nœuds après la sélection des Chs.	63
5.4	ECBDA : energie des nœuds après la sélection des Chs.	64
5.5	LZHREP : energie moyenne des nœuds après l'envoi de 400 paquets.	65
5.6	ECBDA : energie moyenne des nœuds après l'envoi de 400 paquets.	65

5.7	Somme moyenne d'énergie consommée en fonction d'envoi de paquets.	66
5.8	Nombre de nœuds défailants en fonction d'envoi de paquets.	67
5.9	Nombre de nœuds en vie en fonction d'envoi de paquets.	67

Liste des tableaux

2.1	Synthèse des protocoles de routage dans les RCSFs.	31
3.1	Classification des protocoles de routage selon les attributs de clustering.	45
5.1	Paramètres de simulation.	60
5.2	Variables descriptives du système.	61
...		

Liste des algorithmes

1	:Algorithme de la phase de formation de niveau et de zone.	52
2	:Algorithme de la phase d'élection des CHs.	53
3	:Algorithme de la phase de routage de données.	56
4	:Algorithme de la phase de maintenance.	57

Liste des acronymes

ADC : Analog Digital Converter.

ADV : ADVertissinng.

APTEEN : Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol.

BCH : Cluster Head de la station de Base.

CDMA : Code Division Multiple Access.

CH : Cluster Head.

CSOS : Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks.

DD : Directed Diffusion.

DECSA : Distance-Energy Cluster Structure Algorithm.

ECBDA : Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks.

EECS : Energy Efficient Clustering Scheme in WSN.

EERFC : Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster Based Wireless Sensor Networks.

FCH : Faux Cluster Head.

FDMA : Frequency Division Multiple Access.

GPS : Global Position System.

HEED : A Hybride Energy -Efficient Distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks.

Ht : Hard thresthold .

LBNL : Lawrence Berkeley National Laboratory.

LEACH : Law Energy Adaptive Hierarchy.

LZHREP : Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol.

MAC : Media Access Control.

MFR : Most Forward within Radius.

NC : Noeud Capteur.

NS2 : Network Simulateur 2.

OMNeT++ : Objective Modular Network Test-bed in C++.

OPNET : Optimum NETwork Performance.

PEGASIS : Power -Efficient GAthering in Sensor Information System.

QoS : Qualité de Service.

TEEN :Threshild-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol.

Résumé

La technologie "réseaux de capteurs" forme actuellement un domaine de recherche très vaste et a fait l'objet de nombreuses études au cours de ces dernières années.

Les réseaux de capteurs sont des réseaux formés d'un grand nombre de nœuds capteurs qui collaborent entre eux pour fournir un service bien déterminé. Cependant, ces réseaux soulèvent des problèmes fondamentaux pour la communauté scientifique. Le problème majeur de ce type de réseau est la ressource énergétique limitée donc la conservation d'énergie constitue l'un des axes de recherche les plus importants afin de maximiser la durée de vie du réseau.

Dans ce mémoire, nous avons proposé un nouveau protocole de routage hiérarchique qui vise la minimisation de la consommation d'énergie, dénommé LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol) qui utilise des clusters formés sur un réseau structuré en couches et utilise aussi le routage multi-saut entre ces différentes couches. Les résultats de simulation obtenus sous le logiciel Matlab montrent que les performances sont globalement satisfaisantes.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de Routage hiérarchique, Consommation d'énergie, LZHREP.

Abstract

Technology "sensor networks" now form a vast area of research and has been the subject of numerous studies over the last years.

Sensor networks are networks formed by many sensor nodes that work together to provide a well-defined service. However, these networks pose fundamental problems for the scientific community. The major problem with this type of network is the limited energy so in order to maximize the network lifetime, energy conservation is one of the most important research area.

In this work, we have proposed a new hierarchical routing protocol that aims to minimizing energy consumption, called LZHREP (Level Zone and based Hierarchical Routing and Energy Optimization Protocol) which uses clusters formed on a structured network layers and also uses multi-hop between these different layers routing. resultsPerformance evaluations obtained in from Matlab tools show that the results are globally satisfactory.

Key words : Wireless sensors network, hierarchical routing protocol, energy consumption, LZHREP.

Introduction générale

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fils et autres.

Durant cette dernière décennie, une architecture nouvelle a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil. Un réseau de capteurs sans fil (RCSF), ou "Wireless Sensor Network" (WSN), est composé d'un grand nombre de nœuds communicants via des liens sans fil. Ils sont distribués sur une zone donnée afin de mesurer une grandeur physique ou surveiller un évènement. Dans un tel réseau, chaque nœud est un dispositif électronique qui possède une capacité de calcul, de stockage, de communication et d'énergie.

Pour leurs caractéristiques très variées et leur faible coût de production, les RCSFs sont très utilisés dans plusieurs domaines, allant du domaine militaire au domaine médical, en passant par l'industrie, l'écologie, la domotique, l'agriculture de précision, etc .Pour cela, les RCSFs forment un domaine de recherche très vaste et en pleine croissance. Ainsi, mener un travail de recherche dans ce domaine nécessite la connaissance d'un certain nombre de concepts généraux.

Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (*comme par exemple les routeurs dans les réseaux filaires*). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination.

Le principal problème dans les réseaux de capteurs sans fil ou les WSNs "Wireless Sensor Networks" est l'énergie consommée par le nœud capteur, ce dernier est doté d'une batterie ni rechargeable ni remplaçable, Il est donc nécessaire d'avoir

une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour augmenter sa durée de vie en réduisant la perte d'énergie.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les principaux protocoles de routage dans les RCSFs pour ensuite proposer un nouveau protocole de routage qui essayera de prolonger la durée de vie du réseau en économisant l'énergie dépensée par chaque capteur.

Ce travail est organisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les réseaux de capteurs avec une description de leurs architectures et leurs caractéristiques principales ainsi que leurs domaines d'application. Nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs.

Dans le deuxième, nous présenterons les différentes classes des protocoles de routage, et nous citons également quelques protocoles de routage à basse consommation d'énergie.

Dans le troisième chapitre, nous donnons un état de l'art sur les protocoles de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs. A la fin de ce chapitre, nous présenterons une étude comparative entre les caractéristiques des protocoles étudiés.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons notre protocole de routage hiérarchique que nous avons dénommé " LZHREP " (*Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol*) qui est Protocole Hiérarchique de Routage et d'optimisation d'Energie basé sur les Niveaux et les zones.

Dans le cinquième chapitre, nous présenterons les résultats d'évaluation de notre protocole effectué à travers Matlab.

Nous concluons notre travail par une conclusion générale qui résume nos contributions et les perspectives envisageables comme amélioration de notre travail.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les progrès réalisés ces dernières années dans les domaines de microsystème électromécanique ainsi que les techniques de communication sans fil ont permis d'apparaître un nouveau type de réseau : Le réseau de capteurs sans fil (*RCSFs*).

Les réseaux de capteurs sans fil offrent une solution économiquement intéressante pour la surveillance à distance et le traitement des données dans les environnements complexes et hostiles. Ils sont utilisés dans beaucoup de secteurs comprenant une structure technologique tels que l'agriculture, santé, industrie, application militaire et encore d'autres. Malgré ce riche potentiel d'application, les RCSFs sont soumis à plusieurs contraintes telle que la contrainte énergétique, qui rendent la durée de vie du réseau une notion critique.

Dans ce chapitre sont introduites des connaissances de base nécessaires à la bonne compréhension de ce mémoire. Nous exposons une étude détaillée sur les RCSFs : leurs architectures, classifications, caractéristiques, domaines d'application, les facteurs qui influencent sur leurs conceptions et enfin la consommation d'énergie.

1.2 Présentation des réseaux de capteurs

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un équipement qui permet de mesurer une grandeur physique dans l'environnement qui l'entoure telle que la température, le taux d'humidité, des vibrations, pression et qui la transforme en une grandeur numérique capable d'être traitée informatiquement (*un signal souvent électrique*)[1].

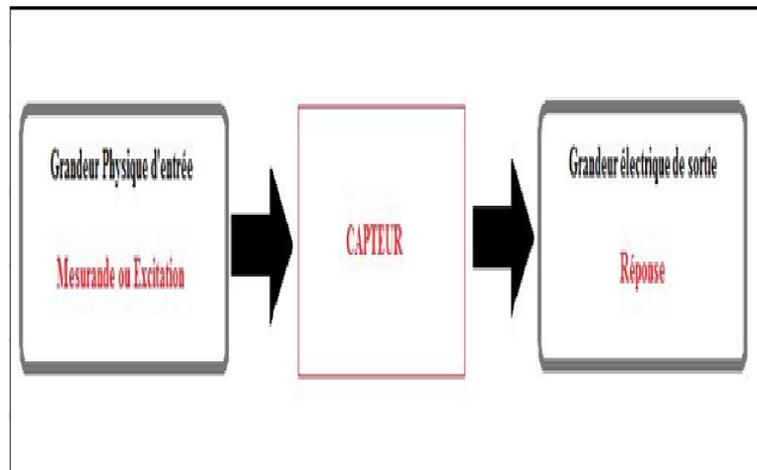


FIGURE 1.1 – Rôle d'un capteur.

1.2.2 Définition d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs sans fil plus connus sous le nom Wireless Sensor Networks (*WSNs*) peut être vu comme un réseau de microsystemes autonomes disséminés dans un espace donné et communiquant entre eux via une liaison sans fil. L'espace où agissent les capteurs s'appelle un champ de captage. Ce qui est intéressant dans les réseaux de capteurs, c'est l'aspect autonome car l'intelligence des capteurs permet de décentraliser l'intelligence du réseau.

Un réseau de capteur sans fils appartient à la famille des réseaux ad hoc. Cependant, on peut noter quelques différences majeures [2] :

- En général, le nombre de nœuds dans un réseau de capteurs est beaucoup plus élevé par rapport a celui d'un réseau ad hoc.
- La topologie du réseau change fréquemment (*ajout/retrait de nœuds capteurs, mobilité relative d'un nœud*).

- Les nœuds capteurs sont déployés en grand nombre pour prévenir d'éventuelles défaillances.
- La communication entre les nœuds capteurs repose en général sur la diffusion, alors que la plupart des réseaux ad hoc utilisant une communication point à point.
- Les nœuds capteurs ont des ressources limitées (*puissance de transmission, de calcul, capacité mémoire*).

1.3 Architecture des réseaux de capteurs

1.3.1 Architecture d'un capteur

Un capteur est composé de quatre unités de base [4] :

Unité de capture (Sensing Unit) : elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs (*Analog-Digital Converter*).

- Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques.
- Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.

Unité de traitement (Processing Unit) : elle est composée de deux interfaces qui sont une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition et de stockage des données collectées.

Unité de communication (Transceiver Unit) : elle est composée d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio.

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

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

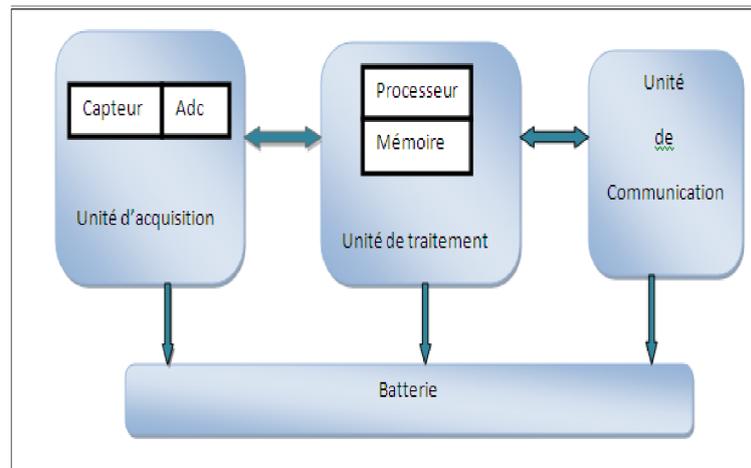


FIGURE 1.2 – Composants d'un nœud capteur.

1.3.2 Architecture d'un réseau de capteur

Les réseaux de capteurs sans fil sont construits autour des quatre principales entités suivantes [3] :

Capteur (Sensor) : comme le dit bien son nom, il est en charge de mesurer une valeur relative à son environnement (*température, pression, luminosité, présence, etc*).

Agrégateur (Aggregator) : il est en charge d'agréger les messages qu'il reçoit de plusieurs capteurs puis de les envoyer en un seul message au puits (*Sink*). Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau et donc de prolonger la durée de vie globale du réseau de capteur.

Puits (Sink) : le puits est le nœud final du réseau. C'est à lui qu'est envoyé l'ensemble des valeurs mesurées par le réseau. Il peut arriver qu'il y'ait plusieurs puits sur un même réseau de capteurs.

Passerelle (Gateway) : la passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il permet de relier le réseau de capteurs sans fils à un réseau plus traditionnel, typiquement l'Internet. En effet, habituellement le réseau de capteurs ne sert qu'à faire remonter les mesures, les applications traitant ces informations étant exécutées sur la machine de l'utilisateur final.

Le fonctionnement global de cette architecture consiste donc à ce que les cap-

teurs fassent des mesures qu'ils font remonter au puits via les agrégateurs. L'application finale tournant sur une machine se situant sur un autre réseau a ainsi accès aux valeurs via une passerelle.

À noter que les agrégateurs sont facultatifs, et que le puits et la passerelle sont généralement localisés dans un seul dispositif.

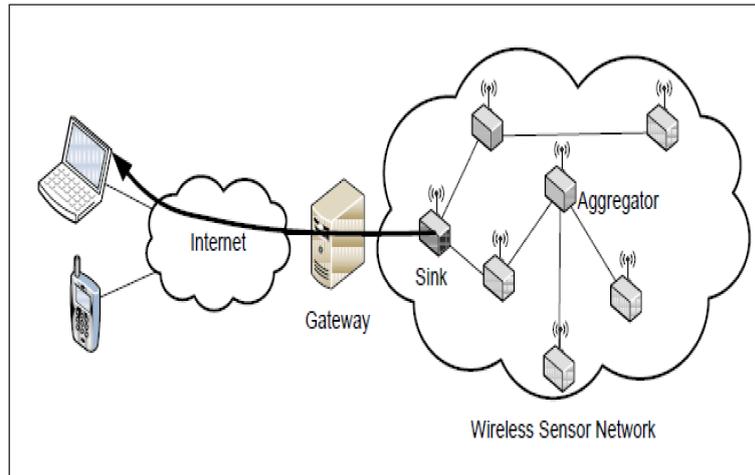


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil.

1.4 Classification des réseaux de capteurs

Il existe plusieurs critères pour classer les réseaux de capteurs. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données aux puits, la distance entre les nœuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des nœuds du réseau [5].

1.4.1 Mode d'acquisition et de livraison des données au puits

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être : continu (*time-driven*), événementiel (*event-driven*), à base de requête (*query-driven*), ou hybride.

Dans le modèle continu, les nœuds doivent périodiquement (*intervalle de temps constant*) réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées au puits. Le type d'application visé concerne les applications de type "surveillance" où le but

principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée.

Dans le modèle orienté événements, les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un évènement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'évènements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'évènement le plus rapidement possible.

Dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leur mémoire. Ils envoient ces mesures seulement lorsqu'ils reçoivent des requêtes de la station de base.

Le modèle hybride est une combinaison des trois modèles précédents.

1.4.2 Selon la distance entre les nœuds capteurs et le puits

Dans cette classification, on distingue les réseaux multi-sauts (*multi-hop WSN*) des réseaux à un seul saut (*Single-hop WSN*).

Dans un réseau de capteur à un simple saut, les nœuds capteurs sont dans le voisinage immédiat du puits. Ils envoient alors leurs données captées directement au puits sans passer par aucun autre nœud intermédiaire.

Dans le réseau de capteur multi-sauts, la distance entre les quelques nœuds capteurs et le puits dépasse leur portée maximale. Pour envoyer leurs données au puits, ils doivent le faire par l'intermédiaire d'autres nœuds. Ce type de réseau a une large gamme d'application mais il est difficile à mettre en œuvre.

1.4.3 Selon le modèle de mobilité dans le réseau

Cette classification consiste en une combinaison entre la mobilité des nœuds capteurs et celle du puits. Par cette combinaison, nous pouvons distinguer deux grandes catégories de réseaux : réseaux statiques et réseaux dynamiques ou mobiles (*static and mobile networks*).

On peut par exemple avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'un puits fixe (*réseau à puits statique et à nœuds capteurs mobiles*). Le but de tels réseaux est la plupart du temps l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses. Un autre exemple est un réseau constitué de capteurs fixes servant à

la surveillance d'occurrence d'événements sur une zone géographique et d'un puits fixe (*réseau statique*).

1.4.4 Selon les capacités des nœuds du réseau

Dans cette classe, on distingue les réseaux homogènes des hétérogènes. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau (*nœuds capteurs, le(s) puits, les passerelles*) ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie du réseau. L'avantage d'un tel réseau est que ces nœuds sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter des tâches plus complexes comme les coordinateurs. Son inconvénient est qu'il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau aura un code (*programme*) propre à lui. Ce qui augmente le coût de développement.

1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs [5], nous citons :

Durée de vie limitée : les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent habituellement sans surveillance dans des régions géographiquement éloignées. Par conséquent recharger ou remplacer leurs batteries devient quasiment impossible.

Ressources limitées : habituellement, les nœuds capteurs ont une taille très petite, ce facteur de forme limite la quantité de ressources qui peuvent être mises dans ces nœuds. En conséquence, la capacité de traitement et de mémoire est très limitée.

Topologie dynamique : la topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide car : les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (*par exemple un champ de bataille*). La défaillance d'un nœud capteur peut donc être très probable. De plus, les nœuds capteurs et les nœuds finaux où ils doivent envoyer l'information capturée peuvent être mobiles.

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

Scalabilité : les réseaux de capteurs engendrent un très grand nombre de capteurs, ils peuvent atteindre des milliers voir des millions de capteurs. Le défi à relever par les RCFSs est d'être capable de maintenir leurs performances avec ce grand nombre de capteurs.

Bande passante limitée : en raison de la puissance limitée, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés.

Sécurité physique limitée : cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui minimisent le contrôle des données transmises.

1.6 Domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, leurs coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (*thermique, optique, de vibrations, etc.*) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir rapidement plusieurs domaines d'applications [6]. Parmi ces domaines, nous citons :

• Domaine militaire

Le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Le Déploiement sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes [7].

• Domaine médicale

Le champ de contrôle de santé (*Health monitoring*) représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente

des organes vitaux de l'être humain (*surveillance de la glycémie, détection de cancers, ..*) grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, le rythme cardiaque, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière [8].

Domaine environnemental

Les micro-capteurs dispersés à partir d'un avion dans une zone difficile d'accès peuvent permettre de détecter des incendies, surveiller des catastrophes naturelles (*inondations, séismes, éruptions volcaniques*), surveiller des phénomènes météorologiques, de détecter de la pollution (*qualité des eaux, taux d'ensoleillement, taux de radioactivité, fuite du pétrole, taux de CO₂...*) [9].

Domaine d'agriculture de précision

Les réseaux de capteurs sont capables d'apporter des bénéfices considérables au domaine d'agriculture, grâce à leur habilité de surveiller les taux de pesticides dans l'eau, le degré d'érosion du sol, détection de parasites, et le niveau de pollution de l'air en temps réel [7].

Domaine industriel

L'intégration des micro-capteurs dans un processus de stockage et de livraison de marchandises peut être utilisée pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [7].

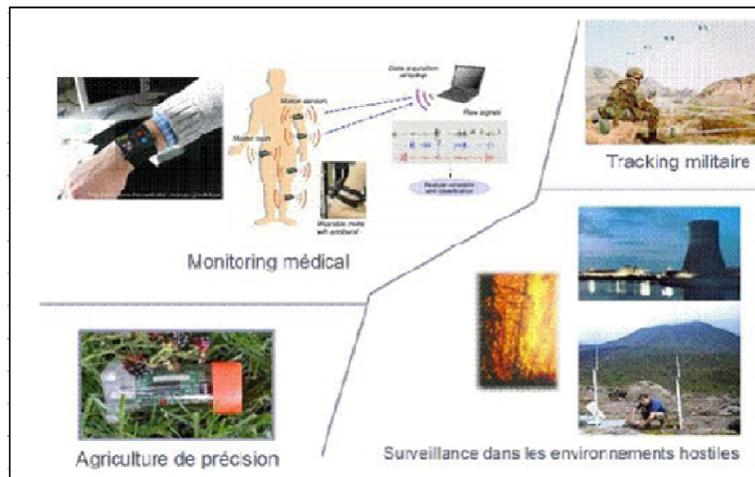


FIGURE 1.4 – Quelques applications des RCSF.

1.7 Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF

La conception et la mise en place des RCSFs sont influencées par plusieurs contraintes qui peuvent être des contraintes conceptuelles ou matérielles. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs; ils sont considérés également comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine.

1.7.1 Contraintes conceptuelles

La conception des RCSFs, leurs protocoles et algorithmes sont guidés par plusieurs facteurs :

Tolérance aux fautes : certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance aux fautes [10].

Tolérance aux fautes : est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs.

Facteur d'échelle (Scalabilité) : le nombre de nœuds de capteurs augmente sur un réseau sans fil et ce nombre peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et peut imposer des difficultés pour le transfert de données [11].

Coûts de production : le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau, si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas rentable. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1 Dollar par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil [12].

Environnement : les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité...

Média de transmission : les nœuds communicants sont reliés sans fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique.

Consommation d'énergie : un capteur, de par sa taille, est limité en énergie ($<1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (*multi-sauts*) chaque nœud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation [13].

1.7.2 Contraintes matérielles

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (*fortes chaleurs, eau,...*), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles [14].

1.8 Communication dans les réseaux de capteurs

1.8.1 Pile protocolaire

Généralement, un réseau de capteur est relié avec d'autres types de réseaux. Pour pouvoir communiquer avec eux, une interface de communication standard est nécessaire. Comme dans les réseaux filaires l'architecture de communication dans les réseaux de capteurs est devisée en couches, en chaque couche à ses rôles et ses protocoles qui opèrent en dessus. Puisque l'objectif d'un réseau de capteurs n'est pas la communication elle-même et que la consommation d'énergie est un critère très important, d'autres unités doivent exister afin de gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches comme le montre la figure suivante [12] :

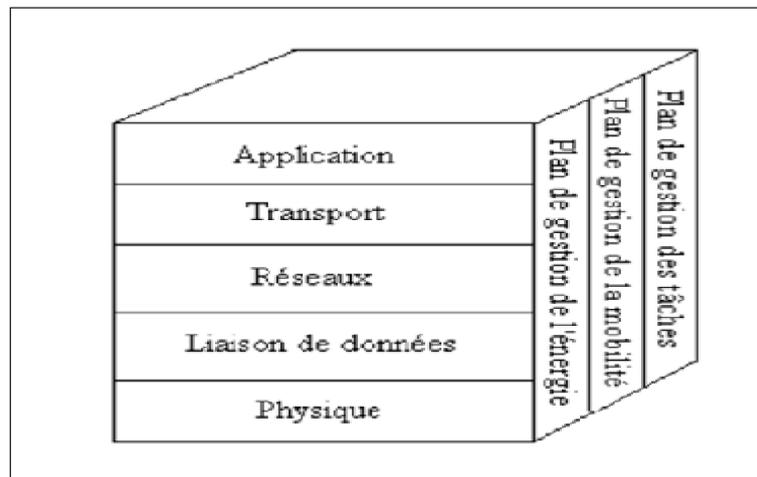


FIGURE 1.5 – Pile protocolaire dans les RCSFs.

A/Couches

Couche physique (Physical Layer) : assure des techniques d'émission, celles de réception et de modulation de données d'une manière robuste.

Couche liaison de données (Data Link Layer) : parmi les fonctions de la couche liaison de données, on peut citer le contrôle d'accès au support de transmission MAC (*Media Access Control*) et le contrôle d'erreur. Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et un taux

de collision minimum entre les données diffusées par les nœuds voisins.

Couche réseau (Network Layer) : s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.

Couche transport (Transport Layer) : cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

Couche application (Application Layer) : la couche application constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (*par exemple ; Internet*). Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

B/ Niveaux (plans) de gestion Les différents niveaux de gestion sont [17] :

Niveau de gestion d'énergie : chargé de contrôler la manière dont un nœud utilise son énergie.

Niveau de gestion de tâche : assure l'équilibrage de la distribution des tâches sur les différents nœuds pour accomplir un travail coopératif.

Niveau de gestion de la mobilité : détecte et enregistre tout les mouvements des nœuds capteurs.

1.9 Consommation d'énergie dans les RCSF

Les capteurs sont conçus avec un module d'énergie limité. Ainsi, cette dernière doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois que l'énergie d'un nœud est épuisée, il est considéré défaillant ce qui provoque une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau.

1.9.1 Les principales opérations dues à la consommation d'énergie

L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes [15] : la détection, le traitement et la communication.

Energie de capture : les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture

Energie de traitement : l'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (*en exécutant un logiciel*). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication.

Energie de communication : l'énergie de communication se décline en trois parties :

l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille.

Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

1.9.2 Modèle de consommation d'énergie

Heinzelman et Al [16] ont proposé un modèle radio de consommation d'énergie. Ainsi les énergies nécessaires pour émettre $ETx(s,d)$ et recevoir $ERx(s)$ des messages sont données comme suit :

☉ Pour émettre un message de s bits vers un récepteur loin de d mètre, l'émetteur consomme :

$$ETx(s, d) = ETx_{elec}(s) + ETx_{amp}(s, d) \quad (1.1)$$

$$ETx(s, d) = (E_{elec} * s) + (E_{amp} * s * d^2) \quad (1.2)$$

☉ Pour recevoir un message de s bits, le récepteur consomme :

$$ERx(s) = ERx_{elec}(s) \quad (1.3)$$

$$ERx(s) = E_{elec} * s \quad (1.4)$$

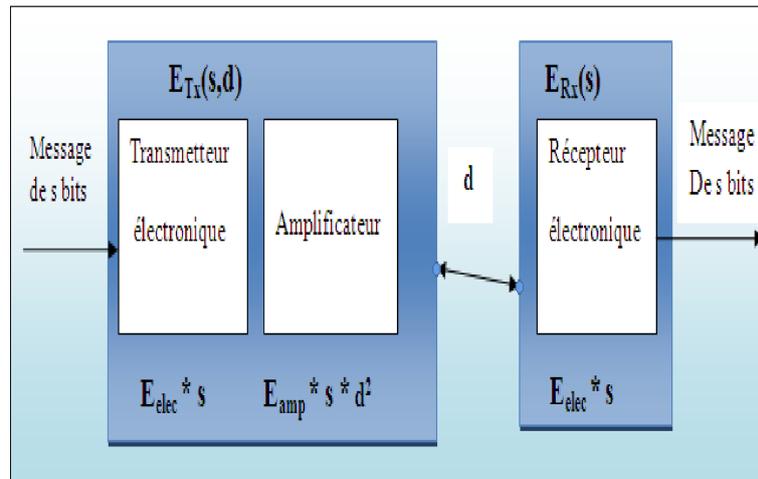


FIGURE 1.6 – Modèle de consommation d'énergie.

1.10 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, industrie ... etc.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, leurs différentes classifications, leurs caractéristiques, leurs diverses applications, la pile protocolaire des capteurs et les différentes opérations dues à la consommation d'énergie d'un nœud. Aussi, nous avons cité les différents facteurs et contraintes qui compliquent la gestion de ce type de réseaux.

En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une vue globale sur les protocoles de routage dans les RCSFs existants dans la littérature et qui ont comme objectif commun le prolongement de la durée de vie du réseau.

Chapitre 2

Routage dans les réseaux de capteur sans fil

2.1 Introduction

Les applications des RCSFs deviennent de plus en plus diversifiées. Cependant, plusieurs problèmes restent à résoudre avant que ces réseaux puissent accomplir au mieux leurs tâches. Parmi ces problèmes se situe le problème de routage. En effet, les nœuds doivent acheminer leurs données à la station de base tout en minimisant la consommation d'énergie. Par conséquent, la conception des protocoles prenant en considération la consommation d'énergie devient cruciale pour la mise en place d'un RCSF viable.

Le mécanisme de routage peut se définir comme un ensemble d'opérations assurant le transport des données entre les nœuds qui fournissent les données et le nœud cible à travers un réseau de connexion donné. Ainsi, un bon routage doit être capable d'acheminer ces informations. De ce fait, sans routage, la communication sur n'importe quel réseau serait impossible.

Dans ce second chapitre, est présentée une classification des différentes approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fils, en citant quelques protocoles de routage à basse consommation d'énergie dans les RCSFs et élaboré une synthèse de ces protocoles.

2.2 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont généralement déployés d'une manière dense dans un champ de captage proche ou à l'intérieur du phénomène capté. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi-sauts sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puits. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant [18] : selon la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement de route et l'initiateur de communication. La classification des différentes approches de routages dans les RCSFs est effectuée selon les critères précédents :

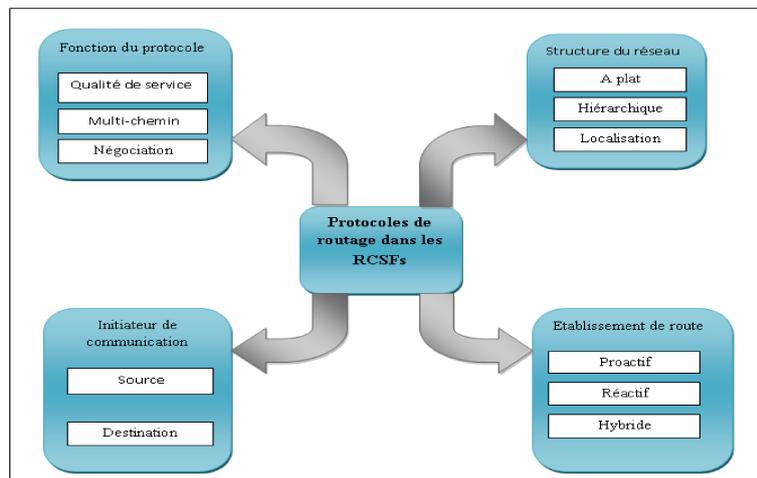


FIGURE 2.1 – Différentes approches de routage dans les RCSFs .

2.2.1 Classification selon la structure du réseau

La structure détermine l'organisation des capteurs dans le réseau et joue un rôle significatif dans le fonctionnement du protocole de routage .Les protocoles de cette classe peuvent être classifiés en trois catégories : Protocole à plat, Protocole hiérarchique et Protocole basé sur la localisation géographique.

Routage à plat (linéaire)

Dans les réseaux à plat [5], chaque nœud joue typiquement le même rôle et collabore avec les autres nœuds afin d'accomplir les tâches de captures. Vu le nombre important de nœuds utilisés, il est presque irréalisable d'assigner un identificateur à chaque nœud. Dans ce cas, le routage linéaire est utilisé, où la station de base lance une requête vers une région et attend les données à partir des nœuds se trouvant dans la région sélectionnée.

Les réseaux plats sont caractérisés par : la simplicité des protocoles de routage, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, Les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routage. De plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité dû au fonctionnement identique des nœuds et d'une manière distribuée nécessitant ainsi un grand nombre de messages de contrôle. La figure suivante illustre l'organisation des capteurs dans une topologie plate [19].

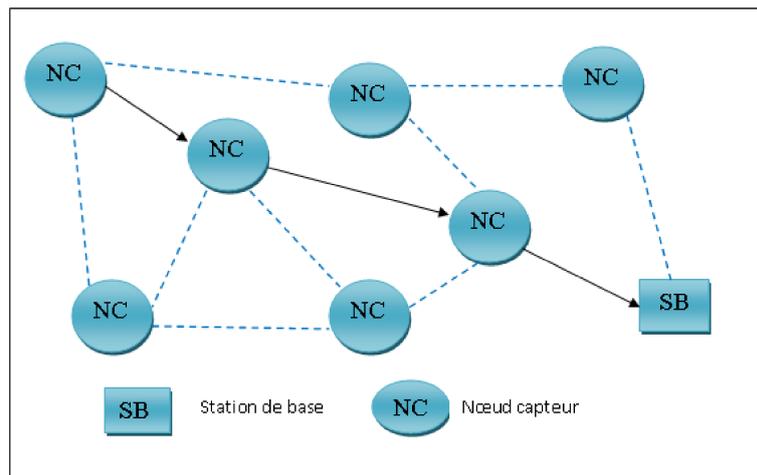


FIGURE 2.2 – Topologie plate.

Routage hiérarchique

Pour remédier aux problèmes de routage linéaire [20], les approches du routage hiérarchique permettent plusieurs niveaux de communication, avec des rôles différents pour les nœuds capteurs. Dans cette technique les capteurs du réseau sont divisés en clusters (*groupe de nœuds*) avec un leader (*cluster-head*) par cluster. Le choix de leader se fait soit à tour de rôle, soit selon le nombre de voisins en considérant comme cluster-head le nœud avec le plus de voisins, soit selon le

niveau de l'énergie résiduelle.

L'ensemble des clusters-head est appelé l'ensemble dominant, alors que les nœuds qui ne le sont pas sont qualifiés de nœuds ordinaires. Pour économiser l'énergie dans le réseau, les nœuds à énergie élevée sont utilisés pour traiter et agréger les données et les envoyer vers la destination finale (*sink*), tandis que les nœuds à énergie réduite, sont employés pour exécuter la tâche de capture. L'avantage majeur de ce type de routage, est l'élimination de la redondance des données. En effet, chaque cluster-head agrège les données afin de diminuer le nombre de messages envoyés à la destination. Mais l'inconvénient c'est que les leaders consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau. S'ils ne changent pas régulièrement, le réseau sera partitionné.

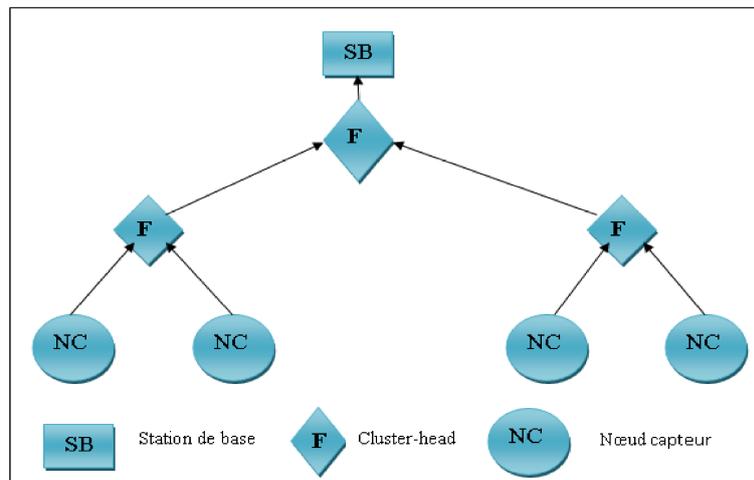


FIGURE 2.3 – Architecture hiérarchique.

Routage basé sur la localisation (géographique)

Dans ce type de routage, les nœuds sont adressés à l'aide de leurs positions. La localisation des nœuds peut être disponible en communiquant avec un satellite, utilisant un système GPS (*Global Positioning System*) pour calculer la distance entre les nœuds afin d'estimer la consommation d'énergie lors des différentes transmissions. En effet, si on connaît à priori l'emplacement des nœuds capteurs on peut les utiliser dans le routage des informations afin de minimiser la consommation d'énergie et de maximiser ainsi la durée de vie du réseau. Par exemple, si la région de captage est connue en utilisant la localisation des nœuds, alors la requête sera diffusée uniquement vers cette région. Par conséquent, un nombre de transmissions sera éliminé de manière significative [21][22].

Ce type de protocoles, minimise la consommation d'énergie, car il élimine les trans-

missions inutiles en envoyant les requêtes de la station de base vers des régions bien précises. Mais en contre partie, il exige une administration centralisée pour le calcul des positions des nœuds et souffre du manque de précision dans les récepteur GPS, ainsi que la consommation élevée de l'énergie.

2.2.2 Classification selon le fonctionnement des protocoles

La fonctionnalité des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs, peut être utilisée comme un facteur de classification de ces derniers. En utilisant ce critère, on peut distinguer trois catégories de protocoles de routage : routage basé sur la Qualité de service (QoS) (Quality of Service) " QoS ", routage basé sur les multi-chemins (*Multi-path routing*), et routage basé sur la négociation (*Negotiation based routing*).

Routage basé sur la QoS (Qualité de service)

Dans les protocoles de routage basés sur la qualité de service, en plus de la consommation d'énergie, la QoS doit être prise en compte. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications de surveillances. En effet, ces protocoles doivent considérer la qualité de service comme une métrique additionnelle à satisfaire dans les décisions des routages [23].

Routage multi-chemins

Au lieu d'utiliser un seul chemin, les protocoles de routage de cette approche maintiennent divers chemins, afin d'augmenter les performances du réseau. Lors d'une défaillance d'un chemin primaire, les données peuvent être acheminées de la source vers la destination, via des chemins alternatifs. Ces derniers sont maintenus par l'envoi périodique des messages [24].

Malgré l'augmentation de la fiabilité et la robustesse du réseau par l'existence de chemins multiples. Mais ils provoquent la perte additionnelle d'énergie due à l'envoi des messages périodiques pour maintenir les chemins alternatifs. Aussi, l'utilisation des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne augmente le risque de perte des paquets.

Routage basé sur la négociation

L'objectif principal de ce type est basé sur la suppression des données redondantes. Le principe des protocoles de cette approche est le suivant [20] : avant de transmettre, les capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre. Cette procédure garantit la transmission des données utiles et élimine la redondance, mais elle risque une perte d'énergie dans le réseau causée par l'envoi des métadonnées, et aussi une longue durée de scénario de négociation cause une délivrance retardée des données.

2.2.3 Routage selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de routage des données, on peut distinguer trois catégories de protocoles [20] : les protocoles de routage proactifs, les protocoles de routage réactifs et les protocoles de routage hybrides.

Protocoles proactifs

Les routes sont établies à l'avance, en se basant sur l'échange périodique des tables de routage. En effet, dans ce type de routage chaque élément de réseau cherche à établir des tables de routage valides en permanence, afin de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles [24]. L'avantage majeur dans ce type de protocoles est la facilité d'acheminement des données, du fait que les routes sont établies à l'avance. Mais le problème est que les routes sont stockées même si elles ne sont pas utilisées.

Protocoles réactifs

Contrairement au routage proactif, les protocoles de routage réactifs déterminent les routes au moment où une transmission doit être réalisée. Pour cela, le routage se fait en deux étapes [25] : la première sert à la recherche du chemin et la seconde consiste au transfert de données. Ces protocoles offrent une meilleure conservation d'énergie par rapport aux protocoles proactifs, mais le problème qui se pose est le délai significatif engendré par l'établissement des routes pour pouvoir émettre des paquets sans la connaissance des routes au préalable et aussi, il est impossible de connaître préalablement la qualité des chemins en termes de bande

passante, délais de transmission . . . etc.

Protocoles hybrides

Ce type de protocoles tire avantage des méthodes réactives et proactives, et limite leurs inconvénients. Ces protocoles appliquent la politique proactive à l'intérieur de la zone de voisinage; au-delà de cette dernière, une politique réactive est mise en place pour chercher les routes.

2.2.4 Routage selon l'initiateur de communication

Les communications dans les réseaux de capteurs peuvent être lancées par les nœuds sources ou par les nœuds destinations.

Communication lancée par la source

Dans les protocoles de communication lancée par la source, les nœuds envoient des données à la destination quand une capture a eu lieu. Ces protocoles sont utilisés [20] dans les applications orientés temps (*time driven*), et orientées événement (*event driven*). Ce qui veut dire, que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds captent certains événements. Ces protocoles sont énergétiquement efficaces à cause de l'absence des requêtes générées par le nœud puits qui consomme beaucoup d'énergie. Mais l'énergie n'est pas la seule préoccupation, en effet des exigences de qualité de services doivent être prises en compte (*fiabilité, . . .*).

Communication lancée par la destination

Ces protocoles [20] sont généralement appliqués dans les applications orientées requêtes (*query driven*), dans lesquelles la destination envoie des requêtes décrivant son besoin. A la réception d'une demande, le nœud de capteur se charge de répondre par une transmission des données s'il ya lieu, sinon une diffusion de cette demande aura lieu a tous les nœuds d'une région topologique.

L'avantage qu'offre ce type de protocoles est que les transmissions inutiles sont éliminées du fait de l'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puits. Mais, la circulation des messages requêtes à grande taille peut causer un

épuisement au niveau des batteries des capteurs.

2.3 Quelques protocoles de routage à basse consommation d'énergie dans les RCSF

2.3.1 Flooding (Inondation)

Pour le flooding, chaque capteur recevant un paquet de données le renvoi à tous ses voisins et ce processus continue jusqu'à ce que le paquet arrive à la destination ou le nombre maximum de saut pour le paquet est atteint (*inondation de tous le réseau*). Cette technique ne nécessite pas des algorithmes complexes pour la découverte des routes mais elle présente plusieurs inconvénients [25] :

L'implosion : se produit lors que les mêmes messages dupliqués sont envoyés à un même nœud.

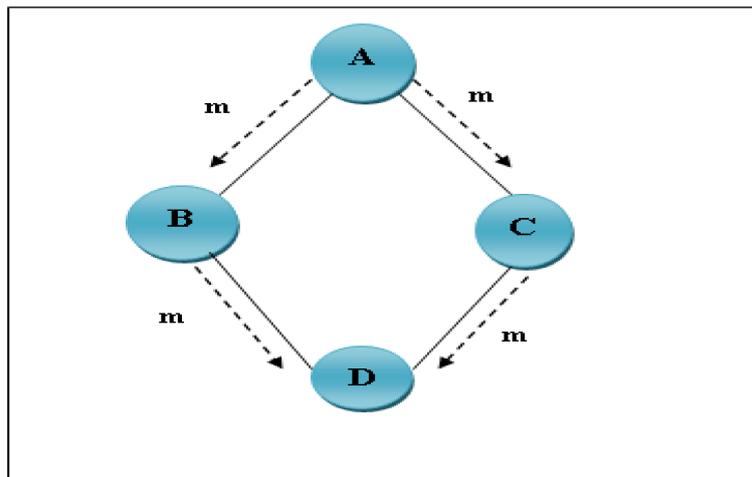


FIGURE 2.4 – problème d'implosion.

Chevauchement : si deux nœuds captent le phénomène dans la même région, la même information sera envoyée deux fois aux nœuds voisins (*redondance*).

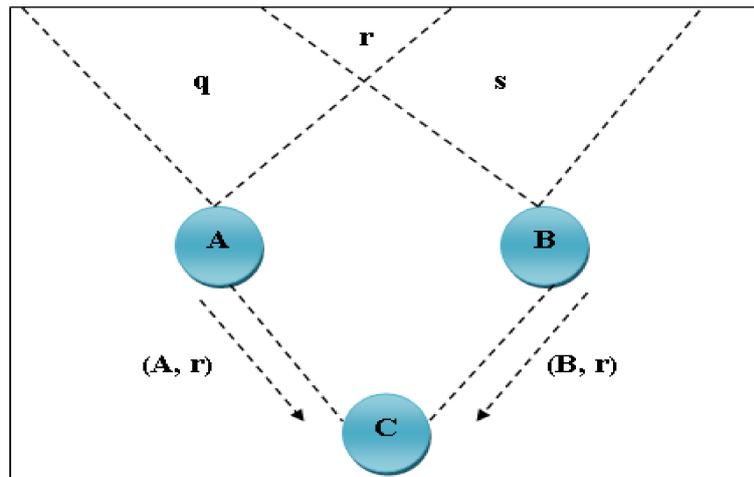


FIGURE 2.5 – Problème de chevauchement.

L'ignorance de ressources : il utilise aveuglement les ressources disponibles sans tenir compte de leurs quantités.

2.3.2 Gossiping

Le Gossiping est une version légèrement améliorée du Flooding, où chaque nœud recevant un message, ne le diffuse pas à tous ses voisins, mais il le transmet à un seul, sélectionné d'une manière aléatoire. En effet, chaque nœud sélectionne aléatoirement un nœud parmi ses voisins pour lui transmettre des données reçues, une fois le nœud voisin reçoit ces données, il les transmet à son tour à un autre nœud qu'il choisit aléatoirement, et ainsi de suite, jusqu'à ce que les données atteignent la station de base.

Bien que ce protocole évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud, il prend beaucoup plus de temps pour propager le message dans tout le réseau [25].

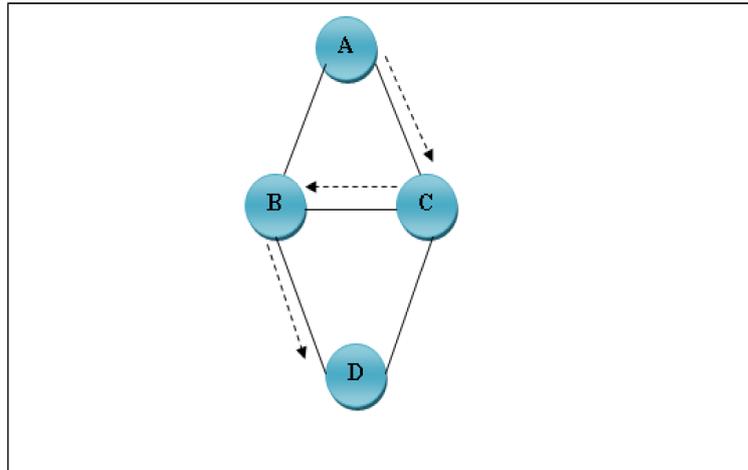


FIGURE 2.6 – Fonctionnement du protocole de Gossiping.

2.3.3 SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)

Le protocole SPIN permet de dissimuler des informations sur le réseau d'une manière ciblée. Le fonctionnement de ce protocole permet de réduire la charge du réseau par rapport aux méthodes de diffusion traditionnelles telles que l'inondation ou l'algorithme de Gossiping [25]. SPIN utilise particulièrement trois types de paquet à savoir ADV (*ADVertissinng*), REQ (*REQuete*) et DATA (*information*). A la réception d'une nouvelle information, le nœud informe tous ses voisins de la disponibilité de l'information par des paquets ADV, et les nœuds intéressés peuvent répondre par un paquet REQ pour acquérir cette information. Le nœud qui a initié la communication envoie alors un paquet DATA pour chaque réponse REQ reçue. La figure suivante récapitule les étapes de fonctionnement du protocole SPIN [25].

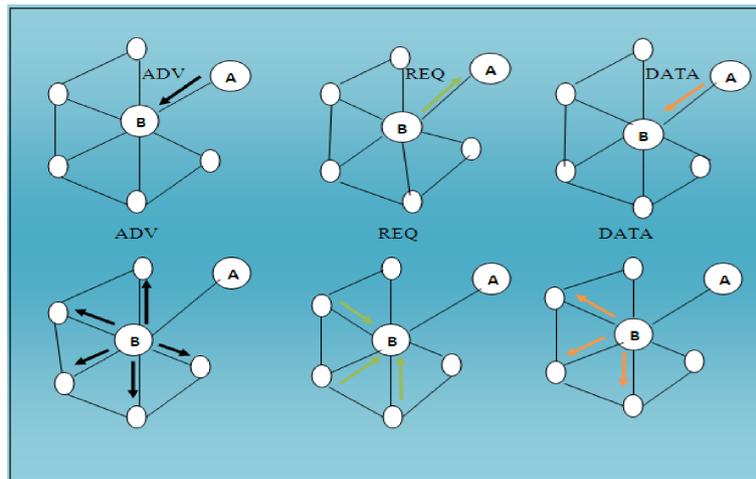


FIGURE 2.7 – Fonctionnement du protocole SPIN

2.3.4 LEACH (Law Energy Adaptive Hierarchy)

Heinzelman et Al ont proposé [16] le protocole LEACH comme un nouveau protocole de routage efficace et qui minimise la consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs. LEACH choisit aléatoirement les nœuds leader et attribut ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin pour garantir une dissipation équitable d'énergie entre les nœuds. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les leader agrègent les données capturées par les nœuds membres qui appartiennent à leur propre cluster, et envoient un paquet agrégé à la station de base. La collection de données est centralisée et se fait périodiquement. Pour exploiter cette caractéristique, protocole introduit un groupement adaptatif, c'est-à-dire, réorganiser les clusters après un intervalle de temps aléatoire, en utilisant des contraintes énergétiques, afin d'avoir une dissipation d'énergie uniforme dans le réseau.

Dans ce protocole chaque nœud transmet des données dans son slot (*tranche de temps*), donc le taux de collision est diminué. Aussi, lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il éteint sa radio pour conserver son énergie donc prolonger sa durée de vie. LEACH nécessite une radio complexe qui augmente la consommation d'énergie et aussi il suppose que chaque nœud communique directement avec la station de base, ce qui cause une large consommation d'énergie pour la transmission des messages.

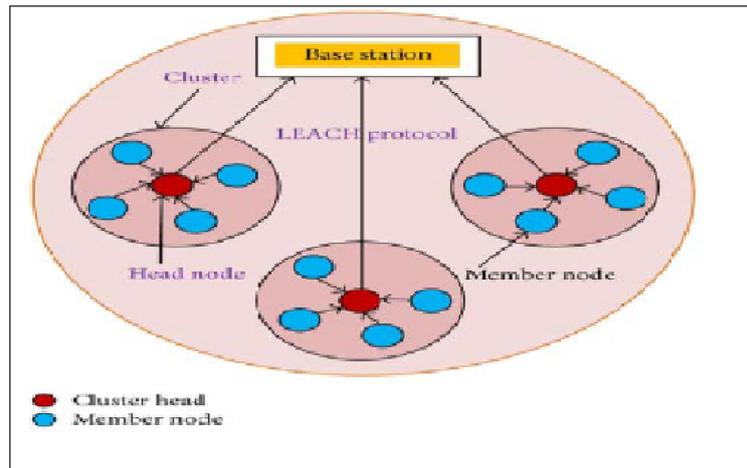


FIGURE 2.8 – Architecture en clusters dans le protocole LEACH [26].

2.3.5 PEGASIS (Power -Efficient GAttering in Sensor Information System)

PEGASIS [46] est une version améliorée de LEACH proposée par Lindsey en 2002, en effet, au lieu de former des groupes multiples, ce protocole construit une chaîne de capteurs ou chaque nœud communique uniquement avec son voisin le plus proche, de la même manière, un et un seul nœud de la chaîne construite peut communiquer avec la station de base pour une période appelée " round ". A la fin de chaque round, un autre nœud choisit aléatoirement prend le rôle de leader dans la chaîne. Ceci réduit la bande passante consommée en favorisant les communications locales entre les nœuds les plus proches, et augmente la durée de vie du réseau.

2.3.6 MFR (Most Forward Within Radius)

Le protocole MFR est considéré comme un protocole de référence appartenant à la famille des algorithmes de routage par localisation.

Dans [27], les auteurs ont proposé MFR comme premier protocole de routage basé sur la localisation. Quand un nœud reçoit un message, il calcule la projection orthogonale de chacun de ses voisins. Le voisin dont la projection orthogonale est la plus proche de la station de base (*la projection la plus loin de la source*) sera ainsi choisi pour la transmission des données. Le processus continue tant que le paquet n'a pas atteint la destination finale (*station de base*).

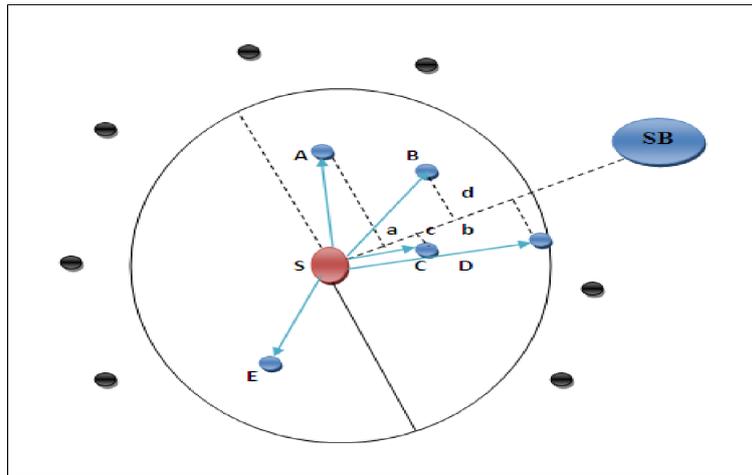


FIGURE 2.9 – Fonctionnement du protocole MFR.

2.3.7 Diffusion Dirigée (DD : Directed Diffusion)

La diffusion dirigée [25] est un protocole centré données qui suppose que les informations générées par les capteurs sont décrits par des paires (*attribut-valeur*), ces attributs servent, par exemple, à décrire le type du phénomène capté, sa position géographique, sa durée, ... etc. La SB réclame les données requises par l'envoi de son intérêt sous forme de requête vers les nœuds du réseau. L'intérêt est diffusé dans le réseau saut par saut et il est émis par chaque nœud à ses voisins. Le format de l'intérêt est basé également sur le schéma des paires (*attribut-valeur*) pour désigner par exemple le type de données requises et le taux de leur transmission vers la SB (*nombre d'événements envoyés par unité de temps*). Durant le processus de dissémination d'intérêt, chaque nœud intermédiaire recevant l'intérêt, maintient à son niveau un cache d'intérêt, ou chaque entrée de ce cache possède plusieurs champs, notamment un champ d'timestamp qui précise l'instant la dernière réception de l'intérêt, en plus d'un certain nombre de gradient (*pouvant aller jusqu'à un gradient par voisin*). Un gradient est un lien de réponse vers un voisin à partir duquel l'intérêt a été reçu. Il est caractérisé par un débit, la durée et le temps d'expiration fournis par l'intérêt. Ces gradients sont établis afin de tracer les routes pouvant être employées ultérieurement pour la collecte des événements captés. L'une de ces routes est par la suite renforcée pour être utilisée. Afin de réduire les coûts de communications, les données sont agrégées sur leur chemin. Le but est de trouver un arbre d'agrégation qui permet l'acheminement de données des nœuds sources jusqu'à la SB. La SB régénère et renvoie périodiquement l'intérêt quand elle commence à recevoir des données à partir de la source. Ceci est nécessaire afin de vérifier que les requêtes sont diffusées dans tout le réseau.

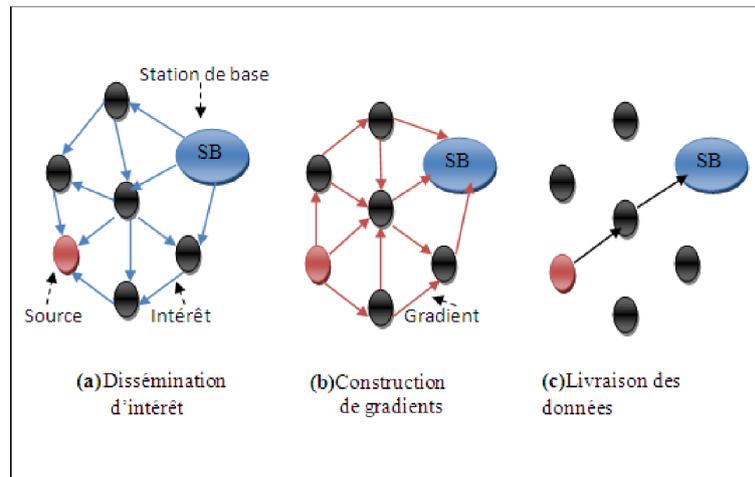


FIGURE 2.10 – Fonctionnement du protocole DD.

2.4 Synthèse des protocoles de routage dans les RCSFs

Après avoir cité quelques protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs, le tableau suivant récapitule les différentes classes associées à chaque protocole ; il indique les protocoles selon leurs appartenances à une ou plusieurs classes, comme il présente une certaine comparaison entre eux suivant l'agrégation des données.

Protocole de routage	Linéaire	Hiérarchique	Localisation	QdS	Multi chemin	Négociation	proactif	réactif	Agrégation des données
Flooding	✓	×	×	×	×	×	×	×	×
Gossiping	✓	×	×	×	×	×	×	×	×
SPIN	✓	×	×	×	×	✓	×	×	✓
LEACH	×	✓	×	×	×	×	×	×	✓
PEGASIS	×	✓	×	✓	×	×	✓	×	✓
GEAR	×	×	✓	×	×	×	×	×	×
DD	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	✓

TABLE 2.1 – Synthèse des protocoles de routage dans les RCSFs.

2.5 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté les différentes classes des protocoles de routage, et nous avons présenté également quelques protocoles de routage à basse consommation d'énergie dans les RCSFs. Nous avons constaté que ces protocoles ont tous un objectif commun qui consiste à assurer le cheminement

des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant de minimiser la consommation d'énergie pour étendre la durée de vie du réseau. Par la suite, nous avons élaboré une synthèse de ses protocoles selon leur appartenance à une ou plusieurs classes et faire une comparaison entre eux suivant l'agrégation des données.

Dans le chapitre suivant, nous intéresserons à l'approche de clustering, ou nous allons énumérer quelques protocoles de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs et exposer leurs principes de fonctionnement et caractéristiques.

Chapitre 3

Etat de l'art sur les protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs

3.1 Introduction

Le routage hiérarchique est une stratégie qui vise à organiser le réseau d'une manière favorable à la réduction de la dissipation d'énergie afin de préserver cette ressource épuisable et non rechargeable. La technique d'hiérarchisation sert à partitionner le réseau en sous ensembles afin de faciliter la gestion du réseau surtout en routage, qui se réalise à plusieurs niveaux.

Dans ce chapitre, est présenté un état de l'art sur les protocoles de routage hiérarchique proposés pour les réseaux de capteurs. Il fournit les caractéristiques d'un protocole de routage hiérarchique et une étude détaillée de quelques protocoles hiérarchiques.

3.2 Caractéristiques d'un protocole de routage hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches classer dans [30] selon :

3.2.1 Algorithmes de clustering utilisés

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, un classement en trois types de ces algorithmes est proposé dans [31] en se basant sur le type d'algorithme de contrôle exécuté :

Centralisé

L'algorithme est exécuté sur le nœud qui a une vue globale du réseau, généralement, au niveau de puis. Ce type d'algorithme est peu utilisé à cause de l'overhead généré suite aux transmissions exécutées pour pouvoir garder la vue globale du réseau et la dynamique de la topologie qui fait que cette vue soit très variable. La vue obtenue par le nœud peut ne plus être valide à l'instant où le nœud la récupère à cause des pannes et des imprévisibles déconnexions.

Distribué

L'algorithme est exécuté en coopération au niveau de chaque nœud du réseau. La synchronisation des tâches de contrôle est obtenue en échangeant des messages de contrôle. Ce type d'algorithmes minimise la communication relative à la sauvegarde de la vue globale du réseau, car chaque nœud décide, indépendamment des autres, de son rôle de faire connaître sa décision par l'envoi de message. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes dépend de la taille et du nombre de ces messages de synchronisation.

Géographique

L'algorithme de la tâche de contrôle à exécuter par un nœud dépend de sa position géographique.

3.2.2 Réélection des Clusters Head (CH)

Par sa fonction, le nœud CH consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le CH coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant ainsi un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour palier à ce problème, une rotation de ce rôle de CH est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement ou bien en fonction de la consommation de l'énergie du nœud CH [31].

3.2.3 Nature des clusters générés

Les algorithmes de clustering utilisés peuvent générer deux types de cluster : des clusters disjoints et des clusters interconnectés. Dans le premier type, un nœud ne peut appartenir qu'à un et un seul cluster à la fois, par contre dans le deuxième type, un nœud peut appartenir à un ou plusieurs clusters à la fois.

3.2.4 Communication intra-cluster

La communication entre le nœud CH et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut ou bien en plusieurs sauts. Dans le cas d'une communication directe (*un seul saut*), les données sont envoyées directement au CH. Cela suppose que les nœuds membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données. Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance entre le CH et les nœuds est grande. Pour réduire la consommation de l'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée. Dans ce cas, chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH. On trouve des techniques employées au niveau MAC pour réduire les collisions, garantir un accès équitable et sans erreurs, à savoir, CDMA (*Code Division Multiple Access*) en utilisant un code pour chaque cluster, TDMA (*Time Division Multiple Access*) en allouant pour chaque nœud du cluster un temps spécifique dit Frame pour envoyer ses données, ou bien, FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) où chaque nœud utilise une fréquence spécifique pour l'envoi de données [32].

3.2.5 Communication inter-cluster

Les CHs communiquent avec la station de base soit directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des " Nœuds Gateway ". Ces nœuds peuvent être des CHs ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la communication en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalabilité du réseau.

3.2.6 Niveau d'agrégation des données

Selon le type des capteurs utilisés, l'agrégation de données peut se faire à chaque nœud du réseau ou bien uniquement au niveau des CHs. L'agrégation des données permet de réduire la taille des données échangées entre les nœuds, et par conséquent réduire l'énergie dépensée. Plusieurs techniques d'agrégation sont utilisées à savoir des fonctions élémentaires comme la somme, la moyenne, l'écart

type, ... etc, ou bien des fonctions plus complexes spécifiques aux applications utilisées.

3.3 Protocoles de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil

3.3.1 EERFC (Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster Based Wireless Sensor Networks)

EERFC [32] est un protocole de routage hiérarchique, il a été proposé pour améliorer le protocole FCA (*algorithme de clustering fixe*). FCA divise le réseau de capteurs en groupes fixes et place le CH au centre du groupe. L'emplacement de ce dernier au centre minimise la consommation d'énergie des nœuds capteurs les plus loin du CH, mais les CHs perdent beaucoup d'énergie lors de la transmission des données à la station de base.

EERFC est une extension de FCA, il sépare les nœuds du réseau de capteurs dans des groupes égaux et sélectionne les CHs par rapport à l'endroit le plus proche de la station de base. Ce protocole minimise la consommation d'énergie du CH, donc prolonge la vie du réseau mieux que FCA.

Avantages

- EERFC réduit certainement la consommation d'énergie des capteurs.
- EERFC prolonge la durée de vie du réseau mieux que FCA.

Inconvénient

- Les clusters générés ne sont pas tellement équilibrés en taille.

3.3.2 CSOS (Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks)

Les auteurs dans [35], ont proposé une technique d'auto-organisation basée sur l'approche de clustering pour optimiser la consommation de l'énergie dans ces réseaux. Cette technique consiste à regrouper les nœuds proches géographiquement en clusters. Elle implique des paramètres déterminants pour produire un nombre réduit de clusters homogènes en taille et en rayon, et que les clusters soient stables. Le poids de chaque capteur est calculé en fonction des paramètres suivants : la densité, l'énergie restante et la mobilité. Le capteur ayant le plus grand poids dans son voisinage à 2 sauts devient cluster head. En outre, la taille des clusters générés est comprise entre deux seuils *ThreshLower* et *ThreshUpper*, qui représentent res-

pectivement le nombre minimal et maximal de capteurs dans un cluster. Ces deux seuils sont choisis arbitrairement ou dépendent de la topologie du réseau. Dans un cluster, chaque capteur membre est au plus à deux sauts de son CH correspondant. Le processus d'élection des CHs est périodique après l'écoulement d'une certaine période t afin de distribuer équitablement la consommation de l'énergie parmi les capteurs durant la durée de vie du réseau.

Avantages

- La puissance de transmission modifiable.
- Les capteurs sont supposés avoir une connaissance topologique à deux sauts.
- Les capteurs peuvent modifier leurs puissances de transmission, et opèrent d'une manière asynchrone et sans contrôle centralisé.

Inconvénients

- Les capteurs ne peuvent pas toujours avoir une connaissance de topologie à deux sauts.
- La diffusion du poids calculé à chaque fois, ce qui surcharge le réseau.

3.3.3 EECS (Energy Efficient Clustering Scheme in WSN)

Dans EECS [36], les auteurs ont proposé une nouvelle technique pour l'élection des CHs et la formation de clusters. Selon cette technique, les CHs candidats doivent router en concurrence pour devenir des CHs. Ces CHs candidats sont choisis parmi les nœuds du réseau selon une probabilité prédéfinie.

Dans la phase d'élection de CHs, un nombre constant de CHs candidats est déterminé. Par la suite ces CHs candidats diffusent des messages à leurs voisins via le support radio selon leur rayon de compétition, annonçant ainsi leurs volontés de devenir des CHs. A la fin, le CH ayant plus d'énergie résiduelle est choisi.

La formation des clusters adoptée par ce protocole est bien différente que celle de LEACH. Avec EECS chaque nœud choisi le cluster auquel il va se joindre selon deux paramètres : la distance qui le sépare du CH et celle qui sépare CH de la station de base.

Les tailles des clusters seraient dynamiques, donc ce protocole permet de construire des groupes qui ont un éventail plus large dès qu'on s'éloigne de la station de base. Par conséquent, ces groupes vont exiger plus d'énergie pour la transmission de données que ceux qui sont plus proches de la station de base.

Avantages

- Ce protocole permet d'utiliser des tailles dynamiques pour les clusters. Il offre une faisabilité similaire à celle de LEACH en termes de mécanisme de recouvre-

ment, avec une meilleure utilisation d'énergie dans le réseau et donc assurer une meilleure connexion.

- EECS présente de meilleures performances en termes de conservation d'énergie et prolongation de la durée de vie du réseau.

Inconvénient

- Nous pouvons rapprocher à ce protocole sa méthodologie de communication employée pour router les données à la station de base. Généralement un seul saut est utilisé. Ce qui consomme beaucoup d'énergie par les nœuds distant pour atteindre la station de base.

3.3.4 TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Il a été proposé par Manjeshwar et Agarwal. TEEN [39] construit une approche hiérarchique avec l'utilisation de mécanismes orientés données, il utilise la même stratégie que le protocole LEACH pour l'étape de formation des groupes, mais adopte une approche différente pour la phase de transmission des données. Durant cette étape, TEEN utilise deux paramètres définis par l'utilisateur appelés " Hard threshold " (Ht) et " Soft threthod " (St) et ceci pour pouvoir déterminer le besoin de transmission de la donnée perçue vers la SB. Si la valeur perçue dépasse Ht pour la première fois, elle est stockée dans une variable et transmise durant le temps alloué par le chef de groupe au nœud concerné. Si la valeur perçue excède, par la suite, la valeur stockée par une magnitude St le nœud décide de la transmettre et stocke cette nouvelle valeur dans son cache pour la comparaison ultérieure.

Ce protocole consomme moins d'énergie puisque le nombre de message transmis est réduit et le seuil St peut être changé selon les besoins.

Avantage

- Il utilise la détection de données ce qui réduit consommation d'énergie.

Inconvénients

- Si les seuils HT et ST ne sont pas reçus, les nœuds ne communiqueront jamais.
- La station de base ne connaît pas les nœuds qui ont épuisé leurs énergies.
- Le protocole ne peut pas répondre aux applications qui nécessitent des envois périodiques de données.

3.3.5 APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Pour remédier aux limitations du protocole TEEN, les auteurs ont proposé une extension de TEEN appelée APTEEN [40]. APTEEN est un protocole hybride qui change la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans APTEEN, les CHs transmettent à leurs membres les paramètres suivants :

- L'ensemble de paramètres physiques auxquels l'utilisateur est intéressé pour obtenir des informations.
- Les seuils : seuil Hard **HT** et seuil Soft **ST**.
- Un Schedule TDMA permettant d'assigner à chaque nœud un intervalle fini de temps appelé slot.
- Un compteur de temps (CT) : c'est la période de temps maximum entre deux transmissions successives d'un nœud.

Dans APTEEN, les nœuds surveillent en continu l'environnement. Ainsi, les nœuds qui détectent une valeur d'un paramètre qui dépasse le seuil HT, transmettent leurs données. Une fois qu'un nœud détecte une valeur qui dépasse HT, il ne transmet les données au CH que si la valeur de ce paramètre change d'une quantité égale ou supérieure à ST. Si un nœud ne transmet pas de données pendant une période de temps CT, il devrait faire une capture de données et les retransmettre.

Avantages

- APTEEN offre une grande flexibilité qui permet à l'utilisateur de choisir l'intervalle de temps CT.
- Les valeurs seuils HT et ST pour que la consommation d'énergie soient contrôlées par la variation de ces paramètres.

Inconvénients

- APTEEN nécessite une complexité supplémentaire pour implémenter les fonctions de seuils et de périodes de temps CT.
- Le surcout et la complexité associés à la formation des clusters à plusieurs niveaux par TEEN et APTEEN sont assez élevés.

3.3.6 HEED (A Hybride Energy -Efficient Distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks)

Les auteurs de [42] 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 CHs 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 CHs dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Un nœud n est élu comme CH avec une probabilité P_{ch} égale à :

$$P_{ch} = \frac{C_{prob} \times E_n}{E_{total}} \quad (3.1)$$

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 CHs et le sink. A l'intérieur de cluster, le problème ne se pose pas car la communication entre les membres du cluster et le CH est directe (*à un saut*). D'autre part, avec HEED, la topologie en clusters ne réalise pas la consommation minimale d'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas équilibrés en taille.

Avantages

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

Inconvénients

- Le fait, que le choix des CHs 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-cluster qui n'est pas prise en considération par cette fonction.
- L'étendue du réseau est posée comme un autre problème d'adéquation de ce protocole pour les réseaux à grande échelle, vu la stratégie adoptée pour la communication entre les CHs et la station de base qui se fait via un seul saut.

- Les clusters générés avec HEED ne sont pas tellement équilibrés en taille.

3.3.7 DECSA (Distance-Energy Cluster Structure Algorithm)

DECSA [41] a été proposé pour améliorer le protocole LEACH. Ainsi il prend en considération la distance et l'énergie résiduelle des nœuds.

Il utilise le modèle hiérarchique à trois niveaux, qui divise les nœuds en quatre catégories : la station de base (SB), les clusters head de la station de base (BCH), les clusters head (CH) et les nœuds capteurs (SN).

Les nœuds qui transmettent les données à la station de base, sont choisis tour à tour selon une politique round-robin dans le but de réduire l'énergie moyenne dépensée par un nœud durant une période (round).

Chaque période, peut-être divisée en deux phases :

- La phase d'initialisation.
- La phase de travail stable.

Phase d'initialisation

Durant une période T , un nœud n choisit un nombre aléatoire nb dont la valeur est comprise entre 0 et 1 ($0 < nb < 1$), si le nb d'un nœud particulier est plus petit que le seuil T prédéfinis, alors le nœud capteur devient le premier tour CH, nous l'appelons faux cluster head (FCH). Et puis, tous les nœuds du cluster calculent respectivement leur $K(i)$, et il leur compare au FCH du cluster. Si elle est supérieure à $K(i)$ du FCH, alors il annonce qu'il deviendra le CH de cluster. Si elle est plus petite, le FCH devient le CH. La consommation d'énergie et la communication dans le réseau, par rapport à la différence $k(i)$; les nœuds qui ont l'énergie résiduelle élevée, et les nœuds qui ont une grande efficacité de communication a la plus grande probabilité d'être élue CH, ce dernier prolonge la durée de vie du réseau.

$$K(i) = E_n(i) \div d_0(i) \quad (3.2)$$

Où :

$K(i)$: est le seuil des élus CH.

$E_n(i)$: est l'énergie résiduelle du nœud i .

$d_0(i)$: est la distance moyenne entre le nœud i et tous les autres nœuds du cluster.

Après l'élection du CH, la phase d'élection des clusters head de la station de base (BCH) est lancée, nous utilisons le seuil TBCH pour sélectionner CH qui

deviendra le BCH. Nous sélectionnons le CH dont son TBCH(i) est supérieure aux autres TBCHs comme BCH. Le reste des CHs se dirige en tant que CHs ordinaires. Nous définissons TBCH(i) comme suit :

$$\text{TBCH}(\mathbf{i}) = (\mathbf{E}_n(\mathbf{i}) \div \mathbf{E}_0) + (\mathbf{E}_n(\mathbf{i}) \div \mathbf{d}(\mathbf{i})) \quad (3.3)$$

Où :

$\mathbf{E}_n(\mathbf{i})$: est l'énergie résiduelle du nœud i.

\mathbf{E}_0 : est l'énergie initiale du nœud dans le réseau, et $\mathbf{d}(\mathbf{i})$ est la distance entre nœud i et la SB.

Phase du travail stable

Dans l'étape du travail stable, en fonction de la valeur de TBCH(i), les BCHs sélectionnent le TBCH(i) maximale des CHs comme son saut suivant, et les sauts qui restent vont être choisis de la même manière jusqu'à ce que tous les CHs soient connectés et forment un chemin de communication complet.

Les nœuds capteurs (SN) d'un cluster transmettent les données à son CH, puis le CH rassemble et agrège les données et les transmettent au BCH, au lieu de les transmettre à la station de base directement, et puis le BCH communique avec SB.

Avantages

- Réduire la communication directe entre la SB et les CHs les plus éloignés.
- Par rapport à Leach, DECSA prend en considération l'énergie résiduelle et la distance.

Inconvénient

- Problème des points chaud.

3.3.8 ECBDA (Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks)

Ce protocole est proposé par [43], ECBDA est divisé en quatre phases : formation de cluster, élection du chef de cluster, l'agrégation des données et la maintenance des clusters. Après la division du réseau en couche, chaque couche sera divisée en série de K clusters. Après la mise en clusters, la phase de l'élection des CHs est exécutée. A partir de chaque cluster, un nœud est choisi comme un CH en utilisant son énergie résiduelle et le coût de communication. Une fois qu'un nœud est élu CH, il diffuse un message à ses membres de cluster, aux autres CHs et à la SB. Le CH attribue un temps TDMA pour chaque membre du cluster pour le

transfert de données. Dans la phase d'agrégation des données, les nœuds membres envoient leurs données collectées au CH du cluster au cours de leurs tranches de temps attribué. Après la réception des données, le CH commence le processus d'agrégation de données.

Phase de formation de cluster

Dans cette phase, la SB sépare le réseau en L niveau (couche), en calculant la distance entre la SB et le nœud le plus éloigné :

$$\alpha = \max\{\forall_{i=1}^N d(\mathbf{sn}_i, \mathbf{BS})\} \quad (3.4)$$

Le nombre de niveaux L dépend de la distance maximale α et de la portée radio des nœuds T_r :

$$\mathbf{L} = \frac{\alpha}{T_r} \quad (3.5)$$

Après on divise chaque niveau l en K clusters en assurant que le premier niveau possède le plus grand K :

$$\mathbf{Kl} = \frac{\mathbf{n}(l)}{(\mathbf{1} \times \mathbf{L})} \quad (3.6)$$

Où :

$\mathbf{n}(l)$: est le nombre de nœuds dans la couche l.

\mathbf{l} : est le numéro de niveau.

\mathbf{L} : est le nombre de niveaux dans le réseau.

Cette phase est exécutée une fois dans le réseau afin de réduire la quantité de message transmis et prolonger la durée de vie du réseau.

Phase d'élection de cluster head

Le CH est choisi en se basant sur l'énergie résiduelle (E_r) et l'énergie de communication (E_c), chaque nœud du cluster calcule sa probabilité de devenir CH :

$$P_{ch}(\mathbf{sn}) = 1 - \frac{(\mathbf{t}_{round}/\mathbf{t}_{tr}) * (\mathbf{E}_c + \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^{\mathbf{n}(c)} \mathbf{E}_{tx}(\mathbf{b}_{sn}, \mathbf{mn}_i)}{\mathbf{E}_r} \quad (3.7)$$

Où :

\mathbf{U} : est l'énergie d'agrégation de données.

\mathbf{t}_{round} : est la durée de chaque tour.

\mathbf{t}_{tr} : est la durée de chaque fenêtre TDMA.

$n(c)$: indique le nombre total des nœuds dans le cluster.

mn : sont les nœuds membres du cluster.

E_{tx} : est l'énergie de transmission de b bits pour communiquer avec les membres du cluster.

Après l'élection des CHs, chaque CH alloue une tranche de temps TDMA pour tous les nœuds de son cluster afin d'éviter les collisions dans la transmission intra-cluster.

Phase d'agrégation de donnée

Après la réception des fenêtres TDMA, les membres de clusters envoient leurs informations au CHs, qui agrègent les données puis les envoient vers la SB. Afin de réduire l'énergie de transmission, ECBDA utilise plusieurs CHs pour le transfert de données vers la SB.

Phase de maintenance des clusters

Ce protocole réparti uniformément la charge pour tous les nœuds dans le cluster. Si le CH est statique, il dissipe toujours plus d'énergie. Ensuite, le CH meurt rapidement. Alors ECBDA utilise cette phase de maintenance afin de modifier le CH au bout d'une période de temps. Cet algorithme est exécuté durant chaque tour.

Avantages

- La taille réduite des clusters proches de la SB permet d'éviter le problème des points chauds.
- Le partitionnement du réseau en couches permet de réduire la consommation énergétique lors de la transmission de données.

Inconvénients

- ECBDA ne garantit pas une distribution homogène des CHs sur le réseau, car le seul critère d'élection du CH est une probabilité aléatoire. Cela n'empêche pas une concentration des CHs dans une région limitée ou détriment de l'ensemble du réseau.
- La transmission de données inter-cluster est aléatoire ce qui permet l'épuisement des capteurs qui sont toujours en cas d'émission.

3.4 Tableau comparatif pour les protocoles de clustering

Pour comparer et analyser les différentes philosophies des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs sans fil selon l'approche de clustering, 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 qui les relient.

Critères Protocoles	Mobilité	Localisation	Couche Mac	QoS	Scalabilité
EERFC	fixe	oui	TDMA	Non	Limitée
CSOS	fixe	oui	TDMA	Non	Non
EECS	fixe	oui	Non précisé	Non	Limitée
TEEN	fixe	Non	TDMA	Non	Limitée
APTEEN	fixe	Non	TDMA	Non	Limitée
HEED	fixe	Non	TDMA	Non	Bonne
DECSA	fixe	Non	CDMA	Non	Non
ECBDA	fixe	Non	TDMA	oui	Bonne

TABLE 3.1 – Classification des protocoles de routage selon les attributs de clustering.

3.5 Conclusion

Notre proposition sera axée sur l'approche de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil. Selon cette approche, une présentation de quelques protocoles a été réalisée ainsi une étude critique a été menée sur ces différents protocoles.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le nouveau protocole de routage hiérarchique qui est nommé LZHERP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol) et nous exposerons en détail son fonctionnement et ses caractéristiques.

Chapitre 4

Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)

4.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil deviennent de plus en plus répandus, ils sont utilisés dans divers domaines. Le développement d'une technique efficace qui garantit une optimisation et une meilleure distribution de la ressource énergétique est un objectif primordial pour les réseaux de capteurs sans fil. L'étude des solutions existantes a montré qu'une topologie hiérarchique basée sur le clustering est plus efficace en énergie qu'une topologie plate.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage hiérarchique à basse consommation d'énergie pour les RCSFS dit "LZHREP " (*Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol*) ou Protocole Hiérarchique de Routage et d'optimisation d'Energie basé sur les Niveaux et les Zones. Il est basé sur la technique de clustering statique, et qui porte une amélioration pour les protocoles ECBDA et DECSA en s'intéressant à leurs inconvénients.

Le protocole ECBDA ne garantit pas une distribution homogène des CHs sur le réseau, car le seul critère d'élection du CH est une probabilité aléatoire, et aussi la transmission de données inter-cluster est aléatoire ce qui permet l'épuisement des capteurs qui sont toujours en cas d'émission. Pour DECSA, il souffre particulièrement du problème du point chaud.

Dans cette proposition, on s'intéresse à la même hiérarchisation que les deux protocoles ECBDA et DECSA qui est sous forme de couche avec k-cluster, en les améliorant avec un partitionnement horizontal selon un angle et aussi une élimination de la sélection aléatoire des CHs et les transmissions aléatoire des données inter-cluster.

4.2 Description du protocole

4.2.1 Motivation

Pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs, il est nécessaire de se baser sur les différents critères concernant les CHs tel que l'énergie résiduelle, la distance qui sépare le CH de la SB. L'objectif consiste donc essentiellement à prolonger la durée de vie du réseau et à éviter son effondrement.

Les algorithmes de clustering pour les réseaux de capteurs permettent la construction des groupes qui s'appellent *clusters* dont chacun est dominé par un chef appelé *cluster head*, son rôle ne se limite pas seulement à l'agrégation de données mais il s'étend aussi à l'organisation de la communication intra-cluster par un seul saut et inter-cluster par le multi-sauts qui garantit une meilleure qualité de réception des données et minimise l'énergie des nœuds.

Notre protocole utilise le routage hiérarchique. Il découpe le réseau en différentes couches afin d'assurer le routage multi-sauts entre les nœuds du réseau et la SB. Puis partitionner chaque couche en plusieurs clusters de différentes tailles. La construction d'un grand nombre de clusters pour la couche la plus proche de la SB avec un petit nombre de nœuds membres pour chaque clusters, et celles qui sont plus loin contiennent un petit nombre de clusters avec un plus grands nombre de nœuds membres. Cela permet de résoudre le problème du point chaud dont souffre DECSA (*les CHs proches de la SB consomment plus d'énergie et meurent plus vite que les autres CHs des autres couches*) et d'améliorer également les performances du réseau en lui offrant une possibilité de conservation d'énergie pour les CHs sélectionnés surtout ceux qui sont proches de la SB.

4.2.2 Hypothèses

Pour une meilleure illustration de notre protocole, nous allons supposer certaines hypothèses en se basant sur le modèle du réseau suivant :

- Les nœuds capteurs sont tous identiques (*même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement de données*).
- Les nœuds sont distribués aléatoirement sur la zone de capture.
- Les nœuds sont fixes, pas de mobilité.
- La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie, pas d'autres causes de défaillances.
- La portée d'un nœud est supposée identique pour tous les nœuds du réseau.
- La station de base est vue comme une ressource non limitée ni épuisable.
- La station de base connaît la position de chaque nœud.
- La station de base est capable d'envoyer des signaux unidirectionnels avec un angle α .

4.2.3 Principe de fonctionnement

Pour prolonger la durée de vie du réseau de capteurs, il faut minimiser la consommation d'énergie de chaque capteur car ils sont dotés de batteries non rechargeables ni remplaçables. Pour cela, chaque nœud doit être conçu pour gérer ses ressources énergétiques.

Notre protocole est basé sur la technique de clustérisation, elle est dédiée aux réseaux de capteurs pour minimiser la consommation d'énergie tout en assurant le bon fonctionnement du réseau. Il adopte un mécanisme permettant de configurer le réseau en couches afin d'assurer un routage multi-sauts entre ces différentes couches. Aussi, il penche sur un balayage horizontal du réseau avec un angle α afin de créer des clusters.

Le fonctionnement de notre protocole est établi en trois phases qui sont : la phase d'initialisation, la phase de routage des données et la phase de maintenance des clusters.

Ces différentes phases seront détaillées dans ce qui suit.

Phase d'initialisation

Cette phase est exécutée une seule fois durant tout le processus de routage, afin de réaliser un regroupement (*Clustering*) des nœuds de capteurs. Cette phase permet de structurer le réseau en clusters statiques. Elle se réalise en trois étapes, la première est caractérisée par la formation des niveaux du réseau, la seconde est réalisée par une division en zones avec un angle α et la troisième correspond à la sélection des CHs.

A la fin de cette phase, notre réseau sera divisé en plusieurs clusters.

1. Formation des niveaux

Dans cette étape, la SB sépare le réseau en L niveaux, en calculant la distance entre la SB et le nœud le plus éloigné [43] :

$$\alpha = \max\{\forall_{i=1}^N d(\mathbf{sn}_i, \mathbf{BS})\} \quad (4.1)$$

Où :

$d(\mathbf{sn}_i, \mathbf{BS})$: est la distance entre la station de base et le nœud sn_i .

Le nombre de niveau L dépend de la distance maximale α et de la portée radio des nœuds T_r [43] :

$$\mathbf{L} = \frac{\alpha}{\mathbf{T}_r} \quad (4.2)$$

Pour partitionner le réseau en couches, la SB utilise le nombre de sauts, tel que les nœuds distants de l sauts appartiendront au lième niveau. Le saut représente la portée de transmission minimale d'un nœud capteur.

La SB envoie L messages " Hello " contenant l'identifiant de la couche de la SB fixée à 0 avec différentes puissances du signal suivant le nombre de sauts pour avoir des distances différentes à la SB.

A la réception du message par les nœuds, ils calculent la distance de la SB et mettent à jour leurs ID_{niveau} à l.

A la fin de cette étape, le réseau est repartitionné en L niveaux, où chaque nœud possède un ID_{niveau} .

Le principe de cette étape est illustré sur la figure suivante :

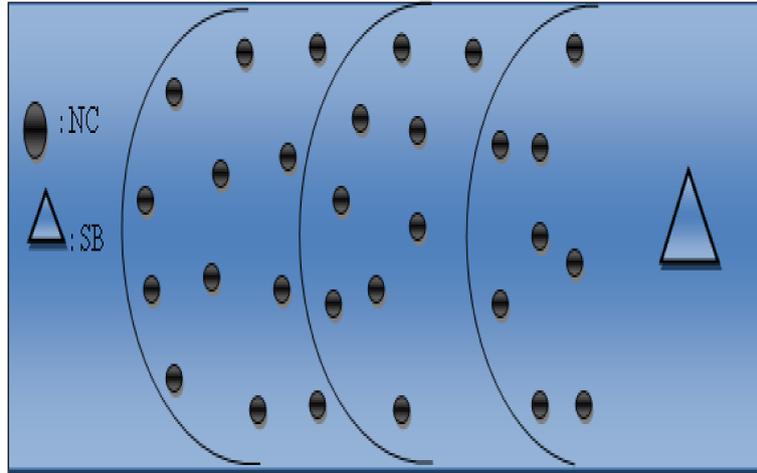


FIGURE 4.1 – Formation des niveaux.

2. Formation des zones

Une technique de découpage en zones est utilisée dans cette étape, chaque niveau sera divisé en un ensemble de K clusters.

La SB calcule le nombre de zone pour chaque niveau, sachant que la couche inférieure aura la plus grande valeur de K cluster. Le nombre de clusters K est directement proportionnel à la densité du niveau $n(l)$ et indirectement proportionnel au nombre de niveau L [43] :

$$Kl = \frac{n(l)}{(1 \times L)} \quad (4.3)$$

Après le calcul de K , la SB effectue un balayage horizontal avec un angle $\alpha=180/K$ sur chaque niveau du réseau. La SB envoie à chaque zone un paquet incluant un identifiant pour chaque zone sur tous les niveaux du réseau. Les clusters seront formés d'une façon à ce que chaque cluster est composé de nœuds avec un même ID_{niveau} et ID_{zone} .

A la fin de cette étape, chaque nœud possède son ID_{niveau} et $ID_{cluster}$.

Le principe de cette étape est illustré sur la figure suivante :

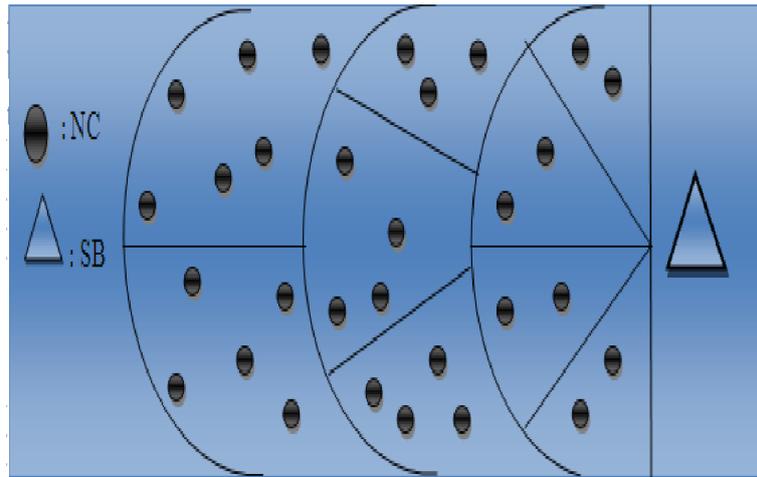


FIGURE 4.2 – Formation des clusters.

L'algorithme suivant illustre le principe des deux étapes précédentes : la Formation des niveaux (*couches*) et des zones (*clusters*) :

Déclaration :

Sni : est le nœud capteur.

SB : est la station de base.

L : le nombre de niveaux dans le réseau.

N(l) : variable pour stocker le nombre de nœuds de chaque niveau.

Tab1 [l] : tableau d'entier qui stocke le nombre de nœuds dans chaque case pour chaque niveau.

Kl : variable pour stocker le nombre de clusters pour chaque niveau.

Tab2 [l] : tableau d'entier qui stocke le nombre de clusters dans chaque case pour chaque niveau.

l, k : compteurs.

ID-Niveau : variable pour stocker le numéro de niveau pour chaque Sni.

ID-Cluster : variable pour stocker le numéro de cluster pour chaque Sni.

α : Angle de balayage. Tr : la portée du nœud Sni.

En : énergie résiduelle du nœud Sni.

Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)

Algorithm 1 :Algorithme de la phase de formation de niveau et de zone.

```

Debut
1 :// SB calcule la distance entre elle et le nœud le plus éloigné
2 :  $D \leftarrow \text{Max } d(Sni, SB)$ ;
3 :// Calculer le nombre de niveaux dans le réseau
4 :  $L \leftarrow \text{Int}(D \div Tr)$ ;
5 :// Calculer le nombre de nœuds dans chaque niveau
6 :Pour l allant de 1 à L Faire
7 :   Si ( $d(Sni, SB) \leq l * Tr$ ) alors
8 :      $Id - Niveau \leftarrow l$ ; // Affecter à chaque nœud son ID-Niveau
9 :      $n(l) \leftarrow n(l) + 1$ ;
10 :   Fin Si
11 :    $\text{Tab1}[l] \leftarrow n(l)$ ; // Sauvegarder le nombre de nœuds de chaque niveau dans un tableau.
12 : Fin Pour
13 ://Calculer le nombre de Cluster dans chaque Niveau
14 :Pour l allant de 1 à L Faire
15 :    $Kl \leftarrow \text{Int}(\text{Tab1}[l] \div (1 * L))$ ;
16 :    $\text{Tab2}[l] \leftarrow Kl$ ; // Sauvegarder le nombre de clusters dans chaque niveau dans un tableau
17 :Fin Pour
18 ://Affecter pour chaque nœud de chaque niveau son ID-Cluster
19 :Pour l allant de 1 à L Faire
20 :    $\alpha \leftarrow 180 \div \text{Tab2}[l]$ ;
21 :    $\beta \leftarrow \alpha$ ;
22 :   Pour K allant de 1 à  $\text{Tab2}[l]$  Faire
23 :     Balayage ( $Sni, l, \alpha, K$ ); //Fonction qui affecte à chaque nœud dans l'angle  $\alpha$  son ID-K
24 :      $\alpha \leftarrow \alpha + \beta$ ;
25 :   Fin Pour
26 :Fin Pour
Fin

```

3.Election des clusters head CHs

Après la formation des clusters (niveaux, zones), la SB effectue une sélection aléatoire dans chaque cluster un FCH (*faux cluster head*) qui aura pour mission d'élire le CH du cluster associé.

Le FCH envoie un message d'élection à tous les membres de son cluster, ces derniers répondent avec un message contenant leurs énergies résiduelles.

Le FCH calcule un seuil d'élection $K(i)$ pour chaque nœud de son cluster.

Le nœud ayant le plus grand $K(i)$ sera élu comme CH du cluster associé.

On définit $K(i)$ comme suit [41] :

$$K(i) = E_n(i) \div d_0(i) \quad (4.4)$$

Où :

$K(i)$: est le seuil des élus CH.

Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)

$E_n(i)$: est l'énergie résiduelle du nœud i .

$d_0(i)$: est la distance moyenne entre le nœud i et tous les autres nœuds du cluster.

L'algorithme suivant présente le principe d'élection des CHs :

Déclaration :

FCH $_i$, CH $_i$: booléen.

K(i) : tableau qui stocke le seuil pour chaque nœud S $_i$.

Max : variable qui stocke le maximum du seuil K(i).

Algorithm 2 : Algorithme de la phase d'élection des CHs.

Debut

```
1 :// SB sélectionne un FCH pour chaque cluster.
2 :Pour l allant de 1 à L Faire
3 :   N ← Tab2 [l];
4 :   Pour K allant de 1 à N Faire
5 :     Max ← 0;
5 :     Si (FCH $_j$  == Vrai) alors
6 :       Envoyer-msg1 ( l , k , FCH $_j$  ) à S $_j$ ;
7 :       Attendre-msg ( K , E $_n$  ) de s $_j$ ;
8 :       Si ( Recevoire-msg ( K , E $_n$  ) de S $_j$  ) alors
9 :         // Calculer pour chaque nœud du membre son seuil
11 :        K ( j ) ← E $_n$  ÷ d $_0$  ( k );
12 :        // Le Max de k(i) des nœuds membre
13 :        Si ( K(j) > Max ) alors
14 :          Max=K(j)
15 :        Fin Si
16 :        Si k(j)==Max alors
17 :          ch $_j$ =vrai
18 :        Fin Si
19 :        Envoyer-msg1 ( l , K , CH $_j$  ) à S $_j$  et SB;
20 :        Fin Si
21 :      Sinon
22 :        Attendre-msg ( l , k , FCH $_j$  );
23 :      Fin Si
34 :   Fin Pour
35 :Fin Pour
Fin.
```

Phase de routage des données

Cette phase assure la collecte et l'acheminement des données vers la SB, en utilisant le multi-sauts pour minimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs et pour augmenter la durée de vie du réseau.

1. Transmission des données intra-cluster

Après la formation des clusters et l'élection de CH pour chaque cluster, les nœuds membres envoient leurs données captées au CH de leur cluster associé.

Afin d'éviter les collisions lors de transmissions des données par les nœuds capteurs, en utilisant l'ordonnancement avec TDMA (*Time Division Multiple Access*), qui alloue aux nœuds membres des slots de temps (*time slot*) appelés frames affectés par leurs CHs afin d'émettre leurs données sans risque de collision. Cela permet aux nœuds capteurs d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots afin d'économiser leurs énergies.

Ces données seront ensuite agrégées par le CH afin d'éviter la redondance des données et la surconsommation d'énergie puis les envoyées au prochain nœud relais.

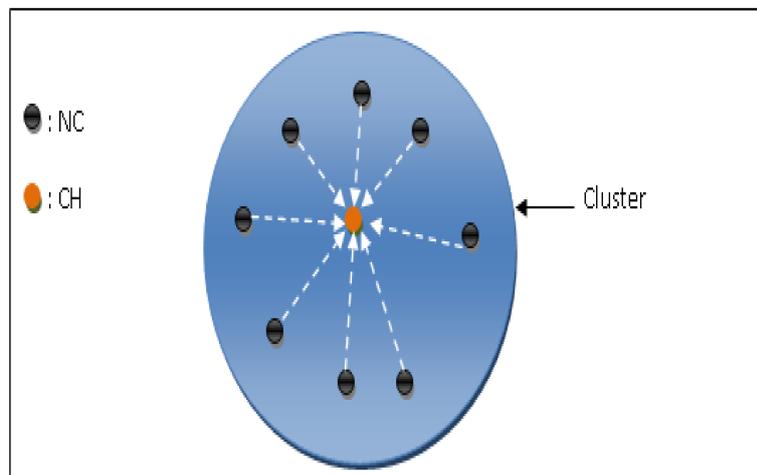


FIGURE 4.3 – Communication intra-cluster.

2. Transmission des données inter-cluster

La plupart du temps, les CHs transmettent leurs données directement à la SB, ce qui engendre une consommation énergétique très élevée et par conséquent, une diminution de la durée de vie du réseau.

Pour remédier à ce problème, le multi-saut est adopté comme mécanisme de routage pour transiter les données de nœud relais aux nœuds relais jusqu'à ce qu'elles arrivent à la SB. Par conséquent, moins d'énergie consommée et durée de vie du réseau prolongée.

Après avoir agrégé les données par les CHs, chaque CH transite ses données au CH de son niveau voisin inférieur et proche de la SB, tandis que les CHs du premier niveau communiquent les données reçues directe à la SB.

Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)

La SB assigne à chaque CH les CHs auxquels il peut communiquer ses données. Le nombre de CHs est obtenu par la formule suivante [44] :

$$S = \frac{K_i - 1}{K_i} \quad (4.5)$$

Où :

$K_i - 1$: est le nombre de CHs dans les (i-1) niveaux avec lesquels chaque CH du niveau i peut communiquer.

K_i : est le nombre de clusters dans le niveau i.

Donc, chaque CH peut communiquer avec S CHs du niveau inférieur dont les angles des clusters de SCHs sont couverts par l'angle du CH.

Après échange de message entre le CH et les SCHs, il choisi le CH avec son énergie résiduelle supérieure comme nœud relais.

La procédure est la même jusqu'à ce que les données arrivent au premier niveau, ou les CHs de ce niveau les envoient directe à la SB.

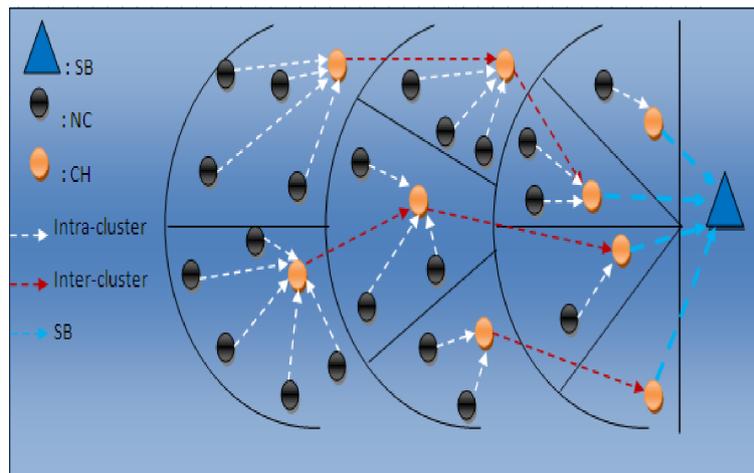


FIGURE 4.4 – Communication inter-cluster.

L'algorithme suivant présente le principe de la phase de routage des données :

Phase de maintenance

Dans les protocoles de routage hiérarchique, la phase de maintenance est très onéreuse grâce à la surcharge imposée sur les CHs par rapport aux nœuds capteurs.

Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)

Algorithm 3 :Algorithme de la phase de routage de données.

Debut
1 :**Pour** l allant de L à 2 **Faire**
2 : // Calculer le nombre de CH dans le niveau l-1 avec qui peut communiquer un CH de niveau l
3 : $S = \text{Tab2}[l-1] \div \text{Tab2}[l]$;
4 : // Choisir les CHs dont l'angle est couverte par l'angle du CH du niveau l.
5 :**Fin Pour**
6 :// Dans le premier niveau, les données sont envoyées directement du CH vers la SB.
Fin.

Lorsque l'énergie du CH approche de l'épuisement, et la batterie arrive au seuil $T = 20$ de son énergie initiale, le système détecte cet épuisement et le CH prend le rôle de FCH pour la sélection d'un nouveau CH de son cluster.

Lorsque les nœuds du cluster ont tous pris le rôle de CH, chaque nœud envoie ses données au nœud voisin le plus proche d'un autre cluster (*soit au cluster de même niveau ou d'autres niveaux*).

Si tous les nœuds de tous les clusters du premier niveau ont pris le rôle de CH, chaque nœud envoie ses données directe à la SB.

Après avoir averti la SB par cela, elle diffuse un message aux CHs du deuxième niveau pour les informer de transmettre les données directement à la SB.

L'algorithme suivant présente le principe de la phase de maintenance.

Protocole LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol)

Algorithm 4 :Algorithme de la phase de maintenance.

```
Debut
1 :Pour l allant de 1 à L Faire
2 :   N ← Tab2 [l];
3 :   Pour K allant de 1 à N Faire
4 :     Si (En de CHk ≤ T) alors
5 :       Si (En de Sni > T) alors
6 :         Réélection-CH();
7 :       Sinon
8 :         Si(l==1)alors
9 :           Envoyer-SB();
10 :        Sinon
11 :          Envoyer-nœud-voisin ();
12 :        Fin Si
13 :      Fin Si
14 :    Fin Si
15 :  Fin Pour
16 :Fin Pour
Fin
```

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre nouveau protocole de routage hiérarchique " LZHREP " selon l'approche de clustering statique pour les réseaux de capteurs sans fil. Le protocole proposé vise à maximiser la conservation d'énergie et la prolongation de la durée de vie du réseau. L'idée de notre protocole est inspirée de deux autres protocoles : ECBDA et DECSA, puis on les a introduit quelques améliorations pour obtenir une nouvelle solution meilleure en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau.

Pour évaluer les performances de notre proposition, nous présenterons dans le chapitre suivant, les résultats des simulations sous Matlab.

Chapitre 5

Evaluation des performances du protocole LZHREP

5.1 Introduction

La simulation est une technique de modélisation du monde réel. Elle consiste à modéliser un système en représentant toutes ses entités, leurs comportements et leurs interactions.

Après avoir proposé un nouveau protocole " LZHREP " et détaillé son fonctionnement dans le chapitre précédant, nous procédons dans ce présent chapitre à l'évaluation des performances de ce protocole. Nous allons présenter un aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs. Ensuite, nous détaillerons l'environnement de simulation de notre protocole. Enfin, nous présenterons les différents résultats fournis par le protocole proposé.

5.2 Aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs

Ils existent plusieurs simulateurs qui peuvent être utilisé dans les réseaux de capteurs, entre autre on trouve :

5.2.1 NS2 (Network Simulateur)

C'est un simulateur développé à Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Le langage de base de NS2 est C++. Il est conçu principalement pour le monde

de l'Internet. Il permet de simuler le comportement des protocoles standard de l'Internet tels que TCP/ IP et il permet également d'étendre le simulateur aux nouveaux protocoles de l'Internet (*routage, transport, application*) et aux nouvelles architectures.

5.2.2 OPNET (Optimum NETWORK Performance)

C'est un simulateur à événement discret. C'est un outil très puissant dédié à l'étude des réseaux de télécommunication. Au niveau architectural, OPNET se décompose en trois parties : la partie modélisation, la partie teste et la partie évaluation chargée de l'analyse des résultats [47].

5.2.3 OMNeT++ (Objective Modular Network Test-bed in C++)

C'est un environnement de simulation à événements discrets. Il est essentiellement utilisé pour la simulation des communications réseaux, mais grâce à son architecture générique et flexible, il est utilisé avec succès dans plusieurs autres champs tels que : les réseaux de fils d'attente, la validation des architectures hardware ... etc.

5.3 Environnement de simulation

Après une longue étude du simulateur OPNET, nous avons constaté que son environnement est très compliqué et le temps nécessaire pour la prise en main de ce simulateur était bien supérieur à l'utilisation d'un logiciel de programmation adapté à nos besoins. Pour ces raisons la, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Matlab.

5.3.1 Matlab

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique [48].

5.3.2 Paramètres de simulation

Les nœuds capteurs utilisés dans la simulation sont homogènes : possédant la même quantité d'énergie initiale, les mêmes capacités de calcul et mémoire, la même portée de transmission et l'énergie de la station de base est illimitée.

Ces capteurs sont déployés dans une zone carrée de taille 500*500 m² contenant 200 nœuds capteurs déployés aléatoirement. Les résultats de simulation obtenus sont la moyenne de 10 itérations simulées. Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés :

Paramètres	Valeur
Nombre de station de base	1
Nombre de nœuds	200
Surface de simulation	500*500 m ²
Portée de transmission	100 m

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation.

5.3.3 Description du système

Notre système représente une zone de captage carrée d'une surface de (500*500) m² comportant 200 capteurs et une SB. De ce fait, les entités de notre système sont :

La SB : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau.

Les CHs : ils agrègent les données et ils participent au routage des paquets dans le réseau.

Les nœuds capteurs : Ils servent à détecter les événements dans la zone de captage.

5.3.4 Variables descriptives du système

Les variables utilisées dans notre système sont illustrées dans le tableau suivant :

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Valeur	Unité de mesure
Energie initiale	E_{init}	Réel	0.7	Joule
Energie consommée lors de l'émission d'un paquet	$E_{transmit}$	Réel	$5 * 10^{-6}$	Joule
Energie consommée lors de la réception d'un paquet	$E_{receive}$	Réel	$5 * 10^{-6}$	Joule
Energie consommée lors de l'agrégation des données	$E_{agregat}$	Réel	$5 * 10^{-7}$	Joule
Position d'un capteur	(x,y)	(Réel,Réel)	(x,y)	(Mètre,mètre)
Distance entre deux capteurs	d	Réel	$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$	mètre

TABLE 5.2 – Variables descriptives du système.

5.4 Evaluation des performances

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de simulations obtenus. Le résultat de chaque scénario est la moyenne de l'exécution de dix simulations indépendantes.

5.4.1 Distribution des nœuds

La figure ci-dessous représente le déploiement des nœuds aléatoirement dans la zone de captage et la division de cette dernière en couches et en clusters. Chaque type de symbole symbolise les nœuds de la même couche, et chaque couleur symbolise les nœuds de la même zone (*cluster*) et le carré représente la station de base.

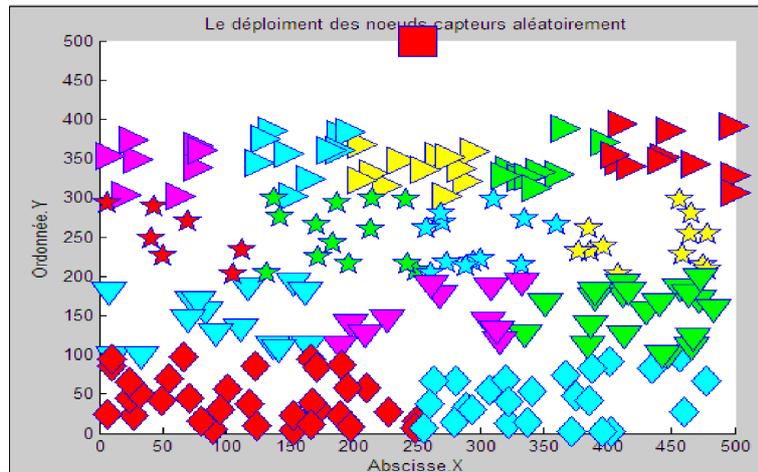


FIGURE 5.1 – Visualisation de la topologie du réseau.

5.4.2 Sélection des Faux Clusters Head et les Clusters Head

La figure ci-dessous représente la zone de captage après la sélection des FCHs et les CHs pour chaque cluster. Les FCHs sont représentés par des petits carrés et les CHs par des cercles.

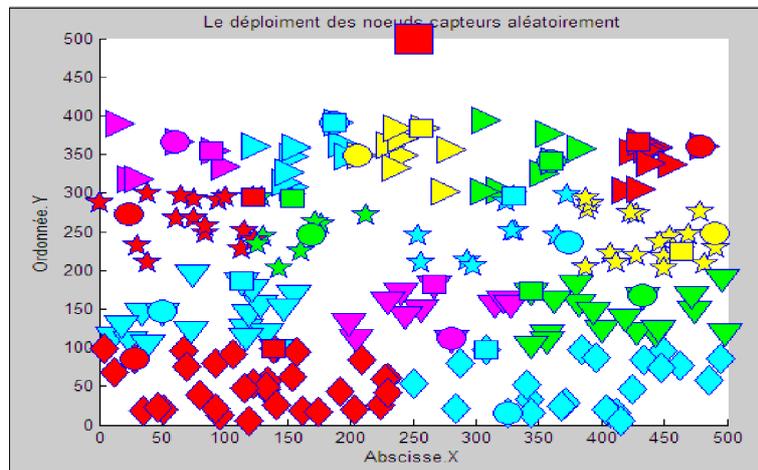


FIGURE 5.2 – Visualisation du réseau après la sélection des FCHs et CHs.

5.4.3 Energie restante après la sélection des Clusters Head

La figure ci-dessous représente l'énergie restante de chaque capteur après la sélection des CHs pour le protocole LZHREP. On constate que l'énergie restante de la majorité des nœuds est à presque 0.7 J alors que l'énergie restante des autres nœuds est descendante, elle descend jusqu'au moins de 0.6998.

Les nœuds dont leur énergie est loin de 0.7 j se sont des nœuds qu'ils étaient choisis comme FCHs. Ils ont dissipé leurs énergies à la sélection des CHs en calculant le seuil d'élection K de chaque capteur et l'envoi et la réception des messages de tous les nœuds de son cluster. Par contre les autres nœuds ont dissipé un minimum d'énergie juste à l'envoi et à la réception des paquets de la part des FCHs.

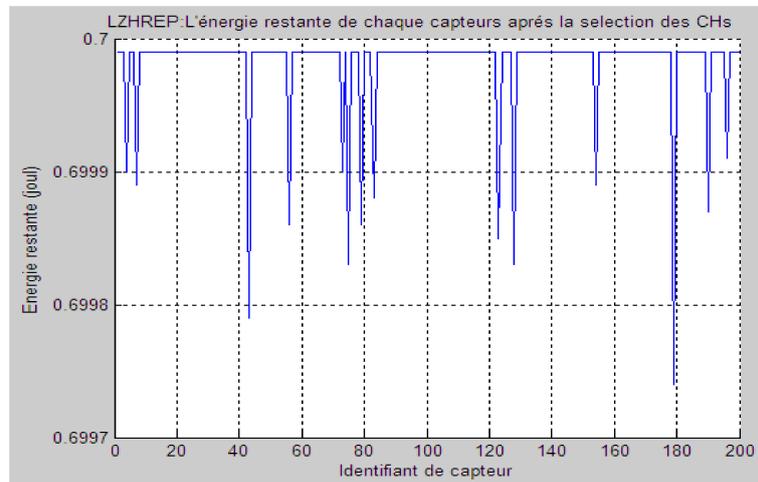


FIGURE 5.3 – LZHREP : energie des nœuds après la sélection des Chs.

La figure ci-dessous représente l'énergie restante de chaque capteur après la sélection des CHs pour le protocole ECBDA. On constate que l'énergie restante de chaque capteur après la sélection des Chs est en dessous de 0.6987. Chaque nœud dissipe une quantité considérable d'énergie et cela est dû au calcul de la probabilité de devenir Ch qui contient plusieurs opérations et d'envoyer des messages contenant cette probabilité à tous les autres nœuds du cluster.

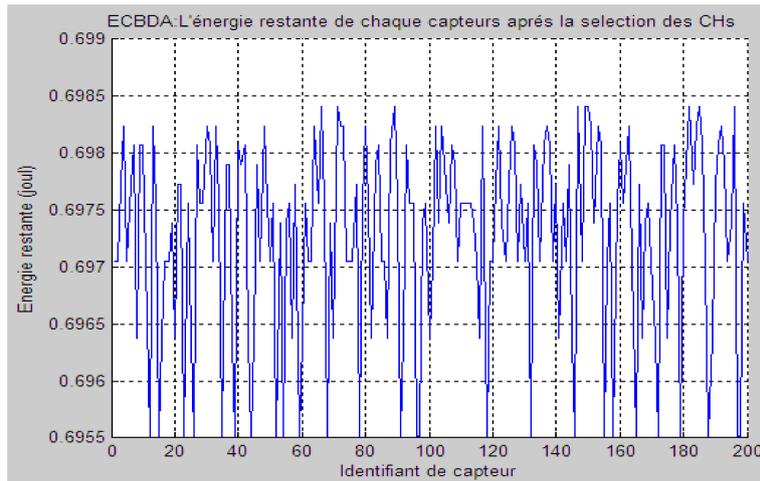


FIGURE 5.4 – ECBDA : energie des nœuds après la sélection des Chs.

Nous comparons notre proposition avec le protocole ECBDA, nous remarquons que l'énergie restante de chaque capteur après la sélection des Chs dans le protocole LZHREP est plus élevée que le protocole ECBDA, ce qui confirme l'efficacité de la technique de sélection des Chs utilisée par LZHREP.

5.4.4 Energie moyenne restante de chaque capteur après l'envoi de 400 paquets

La figure ci-dessous représente la moyenne d'énergie restante de chaque capteur après l'envoi de 400 paquets pour le protocole LZHREP. On remarque que l'énergie restante de chaque capteur ne dépasse pas 0.18 Joule, chaque capteur a dissipé en moyenne 0.5 Joule de son énergie initiale et cela est dû à l'envoi de paquet, à la réception de paquet et l'agrégation des données s'il s'agit d'un CH et à la réélection d'un autre CH après que le précédent a atteins sa borne inférieure d'énergie.

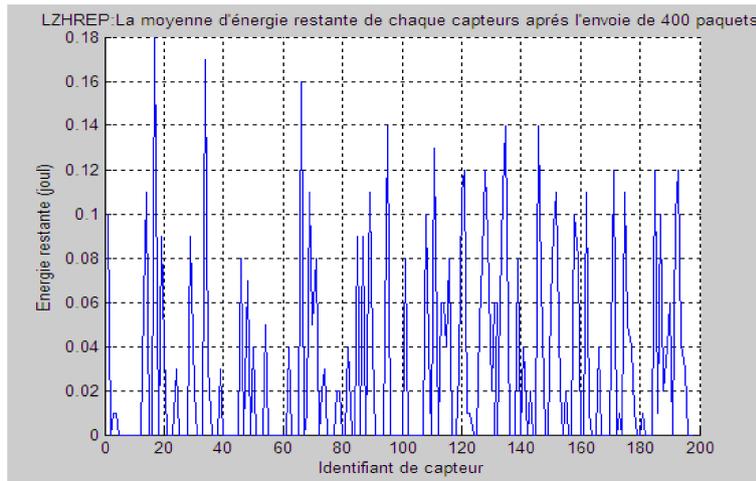


FIGURE 5.5 – LZHREP : énergie moyenne des nœuds après l'envoi de 400 paquets.

La figure ci-dessous représente la moyenne d'énergie restante de chaque capteur après l'envoi de 400 paquets pour le protocole ECBDA. On remarque que l'énergie restante de chaque capteur ne dépasse pas 0.1 Joule donc chaque capteur a dissipé en moyenne 0.6 Joule de son énergie initiale et cela est dû à l'envoi de paquets, à la réception de paquet et l'agrégation de données s'il s'agit d'un Ch, à la réélection de Ch à chaque fin de la période prédéfinie et à la sélection aléatoire des Chs lors des communications inter-cluster.

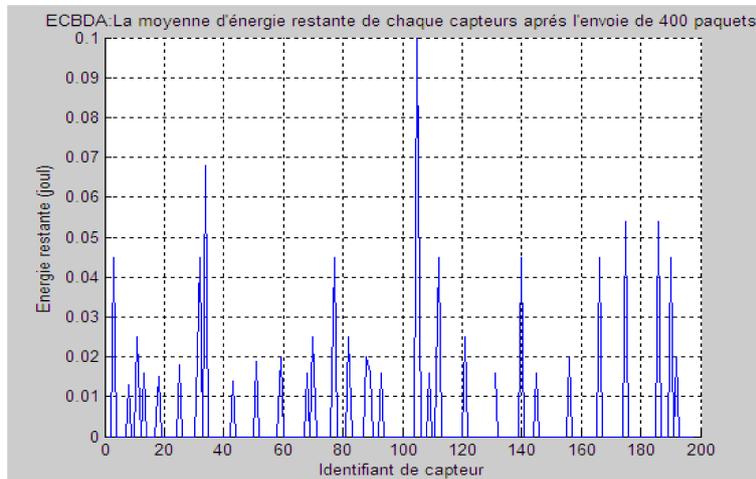


FIGURE 5.6 – ECBDA : énergie moyenne des nœuds après l'envoi de 400 paquets.

Nous comparons notre proposition avec le protocole ECBDA, nous remarquons que la moyenne d'énergie restante pour les capteurs après l'envoi de 400 paquets

pour le protocole LZHREP est plus élevée que le protocole ECBDA. Cette efficacité revient à la condition d'élection et réélection de Ch et de routage inter cluster.

5.4.5 Somme moyenne d'énergie consommée en termes d'envoi paquets

La figure ci-dessous représente la somme moyenne d'énergie consommée en terme d'envoi de paquets dans les deux protocoles. On constate que lors d'augmentation de l'envoi de paquet, l'énergie consommée augmente pour les deux protocoles et cela est dû a l'énergie dissipée par chaque nœud soit par un nœud capteur ou par un nœud CH.

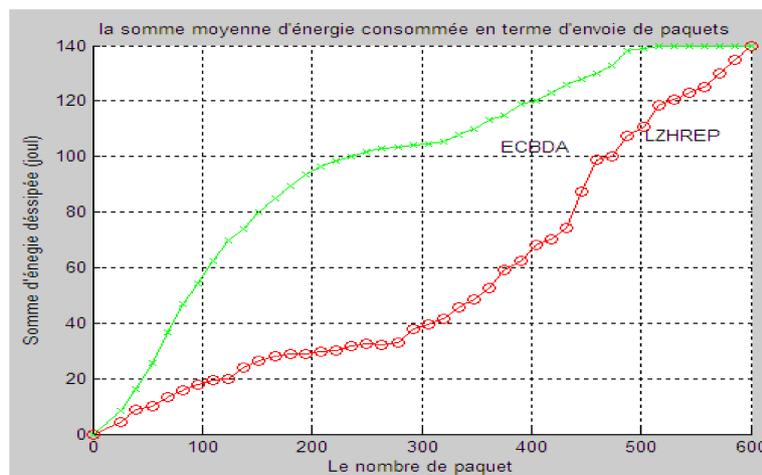


FIGURE 5.7 – Somme moyenne d'énergie consommée en fonction d'envoi de paquets.

Nous comparons les deux protocoles, nous remarquons que le nombre de paquets que le protocole LZHREP peut envoyer avant la défaillance de tout le réseau surpasse le nombre de paquets que le protocole ECBDA peut envoyer, on trouve que LZHREP arrive à envoyer jusqu'à 600 paquets par contre l'autre juste 510 paquets. Par contre l'énergie consommée par le protocole ECBDA surpasse celle du protocole LZHREP et cela est dû à la technique du routage inter-cluster, la condition de réélection du CH et a la phase de la maintenance.

5.4.6 Nombre de nœuds défaillants et ceux qui sont en vie en terme de paquets envoyés

Les figures ci-dessous représentent le nombre de nœuds défaillants et les nœuds en vie en fonction d'envoi de paquets pour les deux protocoles. On constate qu'à

force d'augmenter le nombre de paquets envoyés, le nombre de nœuds défaillants augmente. L'augmentation de nœuds défaillants a pour effet de diminuer le nombre de nœuds fonctionnels dans le réseau et par conséquent ceux choisis comme CHs, ce qui va accroître la charge des autres nœuds et consomment plus d'énergie pour la gestion des clusters.

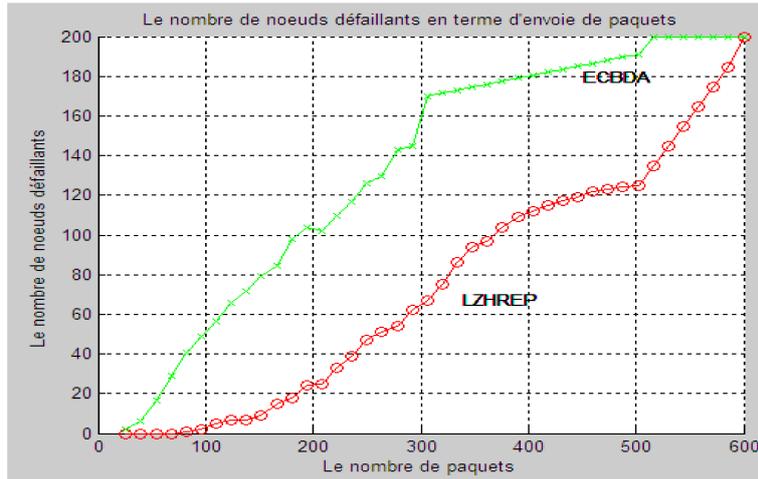


FIGURE 5.8 – Nombre de nœuds défaillants en fonction d'envoi de paquets.

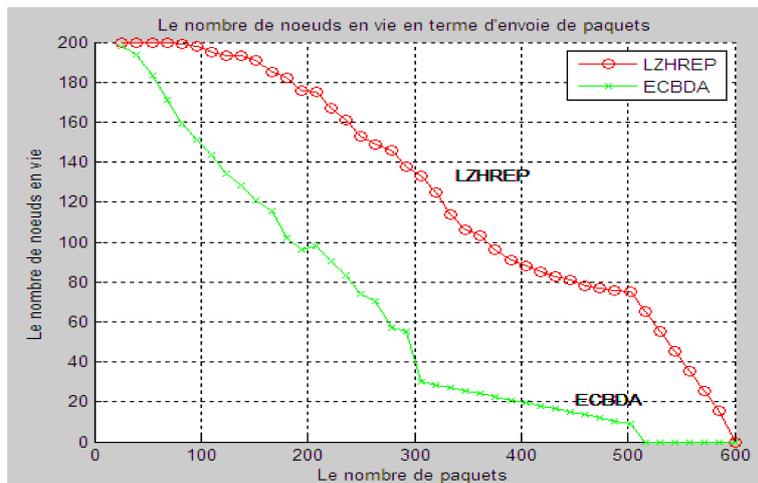


FIGURE 5.9 – Nombre de nœuds en vie en fonction d'envoi de paquets.

Nous comparons les deux protocoles, nous remarquons que le nombre de nœuds défaillants en fonction d'envoi de paquets pour le protocole ECBDA surpasse celui du LZHREP, et contrairement pour le nombre de nœuds fonctionnels. Cette

efficacité est due à toutes les améliorations apportées pour ECBDA et qui sont implémentées en LZHREP.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs ensuite l'environnement de simulation de notre protocole qui est Matlab, et enfin nous avons présenté les résultats de simulation dont nous pouvons conclure que notre contribution LZHREP est plus performants que le protocole ECBDA.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux de capteurs constituent un axe de recherche très fertile et peuvent être appliqués dans plusieurs domaines différents. Cependant il reste encore quelques problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans les conditions réelles.

L'un des problèmes qu'on peut rencontrer dans ce genre de réseau est le problème de routage et le gaspillage de ressource dont l'énergie. Il est donc important de mettre en place des protocoles de routage et d'optimisation d'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau.

Le travail consigné dans ce mémoire a été le fruit d'une recherche menée dans le contexte des RCSF et ce relativement aux problèmes de routage et de gaspillage d'énergie. Pour cela, nous avons présenté une introduction aux réseaux de capteurs sans fil et une étude critique d'un ensemble de protocoles de routage minimisant la consommation d'énergie dans les RCSF.

Notre principale contribution est la proposition d'un nouveau protocole de routage hiérarchique à basse consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol), il prend en considération les contraintes imposées par les capteurs, basse capacité de stockage et durée de vie limitée, en permettant une gestion plus efficace de la ressource énergétique lors de la communication des données dans le réseau. Il adopte une organisation des nœuds du réseau en niveau (*selon la distance par rapport à la station de base*). Cette configuration en niveau offre une souplesse dans la communication des données captées vers la station de base. Notre protocole forme des clusters dans chaque niveau. Cependant, le nombre de cluster dans les différents niveaux est différent, le nombre de cluster est indirectement proportionnel au numéro du niveau, cela veut dire que le nombre de cluster dans le premier niveau dépasse le nombre de cluster dans tous les autres niveaux, ce qui règle le problème des points chauds. Le routage multi-saut est réalisé dans notre protocole entre les

nœuds relais des différentes couches, ce qui permet de consommer moins d'énergie pour atteindre la station de base.

L'évaluation des performances de notre protocole a été simulée en Matlab dans laquelle nous avons constaté que notre proposition est bien meilleure que le protocole ECBDA.

Comme perspectives de notre travail, nous envisageons les points suivants :

- Etablir une comparaison de notre protocole avec plus de protocoles.
- Etudier le comportement de notre protocole dans un environnement mobile.
- Simuler notre protocole sous les simulateurs standards existants (ex. OPNET, NS2 ... etc).

Bibliographie

- [1] : C. Bernard. *Réseaux de capteurs présentation*. Université de Renne, Novembre 2011.
- [2] : P. Deprez, C. Lamorinière, D. Ligot, S. Roche. *Réseaux embarqués - Les WSN et leurs domaines d'applications*. ENSEIRB, 2008.
- [3] : D. Rey. *Collecte des données d'un réseau de capteurs sans fil en utilisant uen surcouche réseau pair à pair*. Mémoire de fin de cycle, département de génie informatique et génie logiciel école polytechnique de montréal. david rey, Avril 2010.
- [4] : Y. Yousef. *Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils*. Thèse de doctorat en Informatique. Computer Science. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010.
- [5] : A. Delye, V. Gauthier, M. Marot, and M. Becker. *Etat de l'art sur les réseaux de capteurs*. Rapport de Recherche INT N-05001RST GET-INT, UMR5157 SAMOVAR, Institut National des Télécommunications, Evry, France, 2005.
- [6] : K. Romer et F. Mattern. *The design space of wireless sensor networks*, in IEEE Wireless Communications, 2006.
- [7] : S. Sentilles . *Architecture logicielle pour capteurs sans fils en réseau* , rapport de recherche, Université de Pau et des pays de l'Adour, juin 2006.
- [8] : A. Milenkovic et al. *Wireless sensor networks for personal health monitoring : Issues and an implementation*. Elsevier, 2006.
- [9] : P. Corke, T.Wark, R.Jurdak, Wen Hu, P.Valencia, D.Moore. *Environmental*

- wireless sensor networks* , Proceedings of the IEEE , Nov. 2010.
- [10] : F. Koushanfar, M. Potkonjak and A. Sangiovanni-Vincentelli. *Fault Tolerance in Wireless Ad hoc Sensor Networks*, Proceedings of IEEE Sensors 2002, June 2002.
- [11] : F. Nekoogar, F. Dowla, and A. Spiridon. *Self organization of wireless sensor networks using ultra-wideband radios*. Atlanta, GA, United States, September 2004.
- [12] : Akyildiz, I.F.,W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. *A Survey on Sensor Networks*, IEEE Communications Magazine, August, 2002.
- [13] : I. Teixeira, J. F. de Rezende, A. de Castro, and A. C. P. Pedroza. *Wireless Sensor Network : Improving the Network Energy Consumption*. in XXI Symposium Brazilian Telecommunications, SBT'04, Belem, Brazil, September 2004.
- [14] : V. Handziski, J. Polastre, J. H. Hauer, C. Sharp, A. Wolisz, and D. Cullery. *Flexible Hardware Abstraction for Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '05), February 2005.
- [15] : V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava. *Energy-aware wireless microsensor networks*. IEEE Signal Processing Magazine, March 2002.
- [16] : W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. *Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks*. In the Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.
- [17] : Akyildiz, I.F.,W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. *A Survey on Sensor Networks*, IEEE Communications Magazine, 2004.
- [18] : R.Akli, K.Bader. *Nouveau protocole géographique à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. Mémoire de fin de cycle en Informatique, Université A.MIRA de Bejaia, Algerie, 2009.

- [19] : J.N Al-Karaki et A. E. Kamal. *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey*, Magazine : IEEE Communications, Dec. 2004.
- [20] : H.Zahra, S.Nadia. *Clustérisation avec équilibrage de charge et routage à basse consommation d'énergie dans les RCSF*. Mémoire de fin de cycle en Informatique, Université A.MIRA de Bejaia, Algerie, 2010.
- [21] : A.Savvides, C-C Han, M.Srivastara. *Dynamique fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensor*, Proc. Of the Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2001.
- [22] : Y.Xu, J.Heidemann et D.Estrin. *Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing*, Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM press New York, NY, USA, 2001.
- [23] : K.Sohrabi, J.Geo, V.Ailawadhi and G.J.Pottie, IEEE Personal Communications, Faculté des sciences et de genie, Université Laval Quebec, 2006.
- [24] : C.Intanagonwiwat, R.Govindan and D.Etrein. *Directed diffusion : a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*, In Proc. ACM Mobicom, Boston, USA, 2000.
- [25] : S.Boulfekhar. *Approche de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs*, Thèse Magister ReSyD, Algerie, 2006.
- [27] : H.Takagi , L.Kleeinnrock. *Optimal Transmission Ranges for Randomely Distributed Packet Radio Terminals*. IEEE Transaction on Communication, vol.32, no3, pp.246-257, Mars 1984.
- [28] : V.Rodoplu , T.H. Meng. *Minimum energy mobile wireless networks*, IEEE Journal of Selected Areas in Communication, Vol. 17, No.8, pp. 1333-1344, 1999.
- [29] : K.Beydoun. *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*. Thèse Doctorat en Informatique, Université Franche-Comte, 2009.

- [30] : T.S.Lin, C.Y.Lee, C.P.Chen, C.L. Chuang and J.A. Jiang. *A Coverage-guaranteed Algorithm to Improve Network Lifetime of Wireless Sensor Networks*. Elsevier Procedia Engineering 5 (2010) 192.195, 2010.
- [31] : A. Makhoul. Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données. *Thèse de Doctorat en Science Pour l'Ingénieur et Microtechnique (SPIM)*, Université de Franche-Comté (LIFC), 2008.
- [32] : M.T Thai and F. Warg. Convergence problems in wireless sensor networks : designs and analysis. *International Journal of Sensor Networks*, Vol. p. 191-200, 2008.
- [33] : Y.F HUNG AND ALL. Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster-Based Wireless Sensor Networks, 2007.
- [34] : A.Zahmati AND ALL. *An Energy Efficient Protocol with Static Clustering for Wireless Sensor Networks*. International journal of Electronics, 2007.
- [35] : M. Lehsaini. *Diffusion et couverture basée sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique*. 2009.
- [36] : M.Ye and All. *An Energy Efficient Clustering Scheme in WSN*, National Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, China, 2002.
- [37] : Y.Qi G.Warg Q.Guo J.Yu and X.Gu. *An Energy-aware Distributed Unequal Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks*. Shandong Computer Science Center, Ji-nan, 250014, China, 2011.
- [38] : B.S.Manjunath B.R.Savitha P.Ullas J.S.Brunda. *Energy Aware Threshold based Efficient Clustering for Wireless Sensor Networks*. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE), Volume 2, Issue4, p.25-30, August 2012.
- [39] : D.P Agrawal A.Manjeshwar. *TEEN : a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks*. Proceeding of 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001.

- [40] : A.Manjeshwar and D.P.Agrawal. *APTEEN : AHybrid Protocol for EFFICIENT Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks*. IPDPS 02, 16TH International aparallel and Distributed Processing Symposium, 2003.
- [41] : Qing Pei Zhu Yonga. *A Energy-Efficien Clustering Routing Algorithm Based on Distance and Residual Energy for Wireless Sensor Networks*. International Workshop on information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012.
- [42] : S.Fahmy O.Younsi. *HEED : AHybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks* . IEEE transactions on mobie computing, vol. 3, no. 4, October-December 2004.
- [43] : C.Thangaraj S.Ranjani,S.R.Krishman. *Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks*. CF1 compus, Tharamani, Chennai 600 113, Tamilnadu , India, 2012.
- [44] : W.Chen W.Jia B.Li J.Xiong H.Li, Y.Liu. *COCA : Constructing optimal clustering architecture to maximize sensor network lifetime*. Computer Communications 36 (2013) 256-268, 2013.
- [45] : Y.Qian R.Yan H.Sun. *Energy-Aware Sensor Node Desigh With Its Application in Wireless Sensor Networks*. IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, VOL.62, NO.5, MAY 2013.
- [46] : A.Zibouda, A.Makhlouf. *Gestion Efficace du Budget Energétique dans le protocole PEGASIS*, Science of Electronics Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), Tunisia, 2012.
- [47] : B.Krishnamachari. *Wireless sensor networks*. Cambridge University Press, 2005.
- [48] : P.Bonnet. *Outils de simulation : Matlab*. Université Lille 1, 2009 - 2010.

Résumé

La technologie « réseaux de capteurs » forme actuellement un domaine de recherche très vaste et a fait l'objet de nombreuses études au cours de ces dernières années.

Les réseaux de capteurs sont des réseaux formés d'un grand nombre de nœuds capteurs qui collaborent entre eux pour fournir un service bien déterminé. Cependant, ces réseaux soulèvent des problèmes fondamentaux pour la communauté scientifique. Le problème majeur de ce type de réseau est la ressource énergétique limitée donc la conservation d'énergie constitue l'un des axes de recherche les plus importants afin de maximiser la durée de vie du réseau.

Dans ce mémoire, nous avons proposé un nouveau protocole de routage hiérarchique qui vise la minimisation de la consommation d'énergie, dénommé LZHREP (Level and Zone based Hierarchical Routing and Energy optimization Protocol) qui utilise des clusters formés sur un réseau structuré en couches et utilise aussi le routage multi-saut entre ces différentes couches. Les résultats de simulation obtenus sous le logiciel Matlab montrent que les performances sont globalement satisfaisantes.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de Routage hiérarchique, Consommation d'énergie, LZHREP.

Abstract

Technology « sensor networks » now form a vast area of research and have been the subject of numerous studies over the last years.

Sensor networks are networks formed by many sensor nodes that work together to provide a well-defined service. However, these networks pose fundamental problems for the scientific community. The major problem with this type of network is the limited energy so in order to maximize the network lifetime, energy conservation is one of the most important research areas.

In this work, we have proposed a new hierarchical routing protocol that aims to minimizing energy consumption, called LZHREP (Level Zone and based Hierarchical Routing and Energy Optimization Protocol) which uses clusters formed on a structured network layers and also uses multi-hop between these different layers routing. Results Performance evaluations obtained in from Matlab tools show that the results are globally satisfactory.

Key words: Wireless sensors network, hierarchical routing protocol, energy consumption, LZHREP.