

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaia

Faculté des Sciences Exactes

Département Informatique



Mémoire de Master Recherche

En Informatique

Option

Réseaux et Systèmes Distribués

THÈME _____

Routage à basse consommation énergétique dans
les réseaux de capteur sans fil à base de
l'algorithme de dijkstra

Réalisé par :

M^{lle} SAIDANI Sabrina.

M^{lle} SOUALMI Siham.

Devant le jury composé de :

Président : M. KHANOUCHE M.Essaid.

Promoteur : M. MIR Foudil.

Examinatrice : M.^{me} KHOULLALENE Nadjet.

Examineur : M. OUZGGANE Redouane.

PROMOTION 2014

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant, de nous avoir donné la force et la patience de pouvoir mener ce travail à terme.

Nos remerciements les plus distingués et notre gratitude vont d'abord à notre promoteur Mr Foudil MIR pour avoir bien voulu nous encadrer le temps qu'il nous a consacré et pour sa patience ainsi que sa compréhension.

Nous remercions chaleureusement Mr OUZEGGANE Redouane, Mr KHANOUCHE M.Essaid, Madame KHOULLALENE Nadjet et tous nos enseignants pour leurs conseils, leurs gentillesse, et leurs générosité.

Nos gratitudes vont également à tous les enseignants qui ont participé à notre formation tout au long de notre cursus.

Que toute personne ait contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve nos sincères remerciements et notre gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents qui ont toujours été là pour moi,

A mes soeurs Souhila, Rabiaa, Zina et son époux Hammou,

A ma chère nièce Malak et mon neveu A.latif,

A mes deux frères Tarik et Sahib et toute ma famille,

A mes chers ami(e)s Bilal, Fadhel, ghouzlene, Azedine, Kahina, jiji, lamia sans oublier ma meilleure amie Lamia Aghouilas et à toutes les personnes que, je connais et surtout à ma très chère amie et binôme Sabrina.

Un grand MERCI à tous.

SOUALMI Siham

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents que j'aime et qui sont la source de la lumière
qui m'éclaire depuis ma naissance,

A mes frères Maci, Meziane et Jugurtha

A mes soeurs Kahina, Koko, Nabila et Chahrazed,

A mes chères nièces et neveux,

A mes chers ami(e)s Toufik, Fairouz, Maci, Bachir, Kahina, Djidji, lamia, ainsi que ma chère
binôme Siham .

SAIDANI Sabrina

Résumé

Avec l'émergence des nouvelles technologies, on a vu l'apparition d'un nouveau type de réseau qui est les réseaux de capteur sans fil.

Ce type de réseau peut être considéré comme un sous-ensemble des réseaux Ad-hoc. Des contraintes spécifiques s'appliquent alors aux utilisateurs de ces réseaux, telles que la gestion des ressources limitées qui caractérisent les capteurs, et qui à une grande influence sur la durée de vie du réseau. L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle approche de routage à basse consommation énergétique tout en améliorer le protocole hiérarchique LEACH et EL-LEACH afin de distribuer la charge dans tous le réseau, et en formalisant la topologie du réseau sous forme d'un graphe complet, puis en appliquant l'algorithme de Dijkstra afin de trouver le meilleur chemin en terme d'énergie.

Nous avons simulé notre proposition avec le simulateur MATLAB en comparant les résultats obtenu avec les protocoles déjà existés. Ces résultats ont montré que les performances de notre proposition est plus performante en terme de leur consommation d'énergie.

Mots-clés :

Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de routage hiérarchique, clusterisation dynamique, Consommation d'énergie, LEACH, LEACH-R.

Abstract

With the emergence of the new technologies, we saw the appearance of a new type sensor of network who is the networks of wireless sensor. This type sensor of network can be considered as an Ad hoc subset of networks.

Specific constraints apply then to the users of these networks, such as the management of limited resources which characterize the sensors and which a big influence on the life expectancy (cycle) of the network has.

The objective of this work is to propose a new approach while improve hierarchical protocol LEACH and LEACH-G to distribute the energy in all the network, and formalizing the network topology in the form of a complete graph, then applying Dijkstra's algorithm to find the best route in terms of energy.

We simulated our proposal with a simulator programmed in MATLAB by appearing the results obtained with protocols already existed. This results showed that the performance of our proposal is a high performance to forward of their energy consumption.

Keywords :

Wireless sensor networks, hierarchical routing protocol, dynamic clustering, energy consumption, LEACH, LEACH-R.

TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	i
Liste des tableaux	iii
Table des figures	v
Liste des abréviations	ii
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les réseaux Ad-hoc	4
1.2.1 Les caractéristiques des réseaux Ad-hoc	4
1.2.2 Les applications des réseaux Ad-hoc	5
1.2.3 Les avantages	5
1.2.4 Les inconvénients	5
1.3 Les réseaux de capteur sans fil	6
1.3.1 Définition d'un capteur	6
1.3.2 Architecture d'un capteur	7
1.3.3 Quelques capteurs existants	8
1.3.4 Définition d'un RCSFs	9
1.3.5 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil	10
1.3.6 Les caractéristiques des RCSF	12
1.3.7 La Communication dans les réseaux de capteurs	13
1.3.8 Facteurs et contraintes de conception des RCSF	15
1.3.9 La comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc	17
1.4 Conclusion	18

2	Routage dans les réseau de capteur sans fil(RCSF)	19
2.1	Introduction	19
2.2	Les facteurs et les contraintes du routage dans les RCSFs	19
2.2.1	Déploiement des capteurs	19
2.2.2	Topologie dynamique	20
2.2.3	Tolérances aux pannes	20
2.2.4	Qualité de service (QOS)	20
2.2.5	La consommation d'énergie	20
2.2.6	Agrégation des données	21
2.3	La classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	21
2.3.1	Classification selon la structure du réseau	22
2.3.2	Classification selon les fonctions des protocoles	28
2.3.3	Classification Selon l'établissement de route	30
2.3.4	Classification selon l'initiateur de communication	31
2.4	Le tableau donne un petit aperçu sur la classification de quelques protocoles de routage dans les RCSFs	32
2.5	Métriques de mesure d'efficacité des protocoles de routage	32
2.5.1	métriques applicables à toutes les architectures des RCSFs	33
2.5.2	métriques significatives seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie	34
2.6	Conclusion	35
3	Etat de l'art sur les protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs	36
3.1	Introduction	36
3.2	Quelques définitions sur la clustérisation	36
3.3	Avantages du routage hiérarchique	38
3.4	Les contraintes de conception d'un protocole de routage hiérarchique	38
3.4.1	Energie limitée	38
3.4.2	Formation de clusters	39
3.4.3	Synchronisation	39
3.4.4	Agrégation de données	40
3.5	Quelques exemples sur les protocoles de routage Hiérarchique	40
3.5.1	LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	40
3.5.2	LEACH-R	41
3.5.3	EL-LEACH (Energy and Load balance LEACH)	42
3.5.4	Les protocoles TEEN et APTEEN	43
3.5.5	SMECN(Small Minimum Energy Communication Network)	44
3.5.6	EECS(Energy Efficient Clustering Scheme in WSN)	45

3.5.7	SOP(Self Organizing Protocol)	46
3.5.8	Le protocole LEACH-C	47
3.5.9	LCH (Layered Clustering Hierarchy protocol) :	47
3.5.10	MCR (Multi-hop Clustering Routing Protocol)	48
3.6	Un tableau comparatif pour les protocoles de routage hiérarchique	49
3.7	Conclusion	49
4	LEACH-G(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy-Graph)	50
4.1	Introduction	50
4.2	Motivation	50
4.3	La notion de la théorie des graphes	51
4.4	Hypothèses	53
4.5	Principe et fonctionnement	53
4.6	La durée de vie du réseau	58
4.7	Le modèle d'énergie	59
4.8	Simulation et analyse des performances de LEACH-G protocole	60
4.8.1	L'environnement de développement	60
4.8.2	Le choix de MATLAB	60
4.8.3	Paramètre de simulation	61
4.8.4	Métriques considérées	61
4.8.5	Résultats de simulation	61
4.9	Conclusion	66
	Conclusion Générale et Perspectives	67
	Bibliographie	viii

LISTE DES TABLEAUX

1.1	différents types des capteurs	9
2.1	Classification et comparaison des protocoles de routages dans les réseaux de capteurs.	32
3.1	Classification des protocoles de routage présentés selon les paramètres de décision et les attributs de clustering.	49
4.1	Les paramètres de simulation.	61

TABLE DES FIGURES

1.1	Un réseau ad-hoc[2].	4
1.2	nœud capteur.	6
1.3	Architecteur d'un capteur [5].	7
1.4	Les types de capteur	8
1.5	Architecture d'un réseau de capteur sans fil	10
1.6	Domaine militaire.	10
1.7	Domaine médicale.	11
1.8	Domaine environnementale.	11
1.9	Domaine commerciales.	12
1.10	Pile Protocolaire dans les réseaux de capteur [4].	14
2.1	Les types de classification des approches dans les réseaux de capteur sans fil.	21
2.2	topologie à plat.	22
2.3	Topologies hiérarchique	24
2.4	le protocole GAF.	26
2.5	Transmission géographique récursive dans GEAR [39].	27
2.6	Protocole de SPIN.	29
3.1	Hiérarchie d'un réseau de capteurs sans fil [52].	38
4.1	Formation des clusters.	55
4.2	Transmission de données.	58
4.3	Modèle d'énergie utilisé.	60
4.4	Déploiement des nœuds.	62
4.5	La somme de l'énergie restante dans le réseau pour 100 nœud.	62
4.6	La somme de l'énergie restante dans le réseau pour 700 nœud.	63
4.7	le premier de nœuds de capteur en fonction de nombre de nœuds.	64

4.8	la mort du 25% de nœuds de capteur en fonction de nombre de nœuds.	64
4.9	la mort du 50% de nœuds de capteur en fonction de nombre de nœuds.	65
4.10	le dernier de nœud de capteur en fonction de nombre de nœuds.	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACQUIRE	AC tive QU ery for wading IN sensor nE tworks.
APTEEN	Ad aptatif Th reshold sensitive E nergy E fficient sensor N etwork protocol.
CAN	C onvertisseur A nalogique N umérique .
CH	C luster H ead.
CDMA	C arrier D evision M ultiple A ccess.
CT	C ompteur de T emps.
DNS	D nergy N ware S outing.
EL-LEACH	E nergy and L oad blance leach.
EECS	E nergy E fficient C lustering S cheme in WSN.
EED	E nd-to E nd D elag.
GAF	G eographic A daptive F idelity.
GEAR	G eographic and E nergy A ware R outing .
GPS	G lobal P ositioning S ystem.
HEED	A H ybrid E nergy- E fficient D istributed clustering approach for ad-hoc sensor network.
LCH	L ayered C lustering H ierarchy protocol.
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy.
LLC	L ogical L ink C ontrol.
LML	L 'algorithme des boucles M arkoviennes L ocales.
MAC	M edium A ccess C ontrol.
MANET	M obile A d hoc N ETwork.
MCR	M ulti-hop C lustering R outing protocol.

PDA	P ersonal D igital A ssistant .
PEGASIS	P ower-Efficient G Athering in S ensor I nformation S ystem .
QdS	Q ualité d e S ervice.
QoS	Q uality of S ervice .
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il.
RF	R adio F réquence.
RR	R umor R outing.
SAR	S equential A ssignement R outing .
SB	S tation de B ase .
SPIN	S ensor P rotocols for I nformation via N egotiation .
SMECN	S mall M inumum E nergy C ommunication N etwork.
SOP	S elf O rganizing P rotocol.
TEEN	T heshold sensitive E nergy E fficient sensor N etwork .
TDMA	T ime D evision M ultiple A ccess .
WSN	W ireless S ensor N etwork.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les réseaux sans fil sont apparus afin de remédier aux incompétences des réseaux filaires qui nécessitent un câblage beaucoup trop onéreux, et qui prend un temps d'installation considérable. Parmi ces réseaux le réseau Ad-hoc. Au départ, ce réseau est utilisé pour la surveillance dans les domaines militaires. Cependant, leur incapacité de recouvrir des zones à grande échelle à susciter les chercheurs à concevoir les réseaux de capteurs sans fil, c'est dans ce contexte que ces types de réseaux ont vu le jour.

Ainsi les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent un domaine très prometteur. Ils concernent une grande variété d'applications dans divers domaines, sachant que ses nœuds capteurs sont déployés dans une zone géographique afin de collecter des données sur l'environnement et de les router vers la station de base où ces données seront transférées par satellite à un utilisateur final. Cependant ces données peuvent ne pas atteindre leur destinataire final à cause des capteurs qui sont sujets à des formes de défaillances, qui affectent leur fiabilité. Cela concerne leurs batteries qui est impossible à recharger même irremplaçable. Plusieurs travaux de recherche ont été menés afin de trouver des solutions permettant d'économiser l'énergie des capteurs et prolonger la durée de vie du réseau.

Notre travail consiste à développer une nouvelle approche de routage hiérarchique à basse consommation énergétique. De même, assurée le routage des données collectées en utilisant un l'un des algorithmes de la théorie des graphes tel que dijkstra, ce qui permet d'acheminer les données collectées vers des routes ayons un poids minimal tout en assurant le multi-saut.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres et chaque chapitre est décrit comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons présenter quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, commençant ainsi par l'apparition des réseaux Ad-hoc, puis nous passerons à quelques définitions concernant les capteurs, puis nous parlerons de leurs architecture, leur domaines d'applications et finirons par une comparaison entre les capteurs et les MANETs . Dans le deuxième chapitre nous allons aborder le routage à basse consommation énergétique durant lequel nous discuterons et comparerons entre les différents protocoles de routage visant à minimiser la consom-

mation énergétique.

Pour le troisième chapitre nous allons définir les différents facteurs et contraintes des réseaux de capteurs sans fil, puis nous allons nous intéresser aux protocoles de clustering en citant quelques exemples et en apportant une étude critique pour chaque approche, ainsi que leurs comparaisons. Par la suite, nous allons consacrer le dernier chapitre à la présentation de notre proposition visant à assurer l'efficacité énergétique, et cela après avoir défini quelques notions sur la théorie des graphes. Ce protocole sera basé sur la clustérisation dynamique tout en améliorant le protocole de routage Hiérarchique LEACH. puis nous allons présenter les résultats de simulation développés sous MATLAB.

Enfin, nous allons terminer notre mémoire par une conclusion générale qui résume les points élaborés ainsi que les perspectives de recherches pour les futurs travaux.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL (RCSFS)

1.1 Introduction

Les récentes découvertes dans le domaine informatique moderne ont permis l'aboutissement de grands exploits technologiques, la puissance de calcul, la portabilité, l'autonomie, la réduction de coût, tous ces facteurs ont contribué à la naissance d'un nouvel air qui est la technologie sans fil, cette dernière a répondu aux exigences de l'utilisateur d'avoir accès à l'information n'importe où et n'importe quand. Mais cette technologie qui ne cesse de progresser nous a montré d'autres perspectives concernant les réseaux sans fil, cette dernière engendra deux catégories :

Les réseaux avec infrastructure qui sont composés d'un ensemble de stations de base, et des sites fixes, sachant que le type de liaison entre les sites fixes (station de base) est câblé, alors que la liaison entre les unités mobiles et la station de base est sans fil, de même que les unités mobiles et les stations de base se trouvent dans une zone géographique limitée, appelée cellule.

Alors que les réseaux sans infrastructure ne possèdent pas de sites fixes, aucune administration centralisée, sachant que toutes les unités mobiles communiquent directement entre elles à travers un média sans fil, c'est dans cet environnement que les réseaux Ad-hoc sont apparus.

Et les réseaux Ad-hoc à leur tour ont donné naissance aux réseaux de capteurs sans fil sur lesquels se concentre notre étude.

Dans ce chapitre nous allons voir quelque généralité sur les réseaux Ad-hoc, puis nous passerons aux RCSFs.

1.2 Les réseaux Ad-hoc

Un réseau Ad-hoc, appelé généralement MANETs (Mobile Ad-hoc Network), est une collection d'unités mobiles munies d'interfaces de communication sans fil, formant un réseau temporaire sans recourir à aucune infrastructure fixe ou administration centralisée [1]. Dans un tel environnement, les unités se comportent comme des hôtes et/ou des routeurs. Les nœuds des MANETs sont équipés d'émetteurs et de récepteurs sans fil utilisant des antennes qui peuvent être omnidirectionnelles (broadcast), fortement directionnelles (point à point), ou une combinaison de ces deux types. Ils maintiennent d'une manière coopérative la connectivité du réseau, en fonction de leurs positions, la configuration de leurs émetteurs/récepteurs, la puissance de transmission et les interférences entre les canaux de communications.

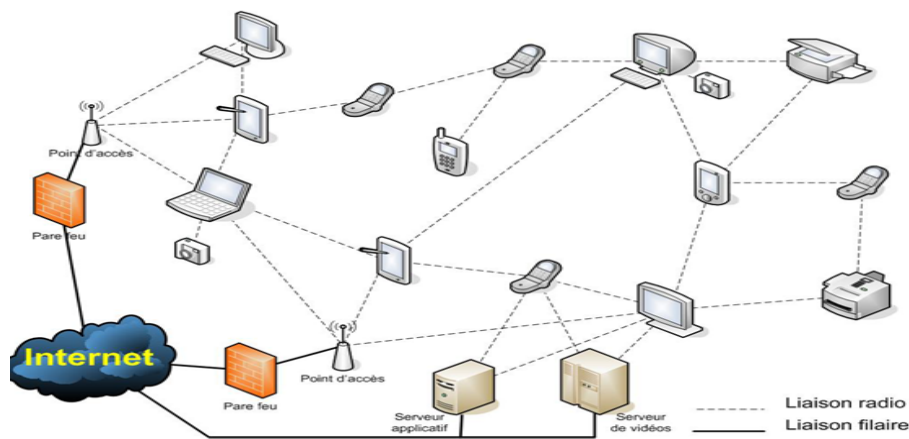


FIGURE 1.1 – Un réseau ad-hoc[2].

1.2.1 Les caractéristiques des réseaux Ad-hoc

Un réseau mobile Ad-hoc est caractérisé par :

- **Une topologie dynamique** : constitue de plusieurs hôtes mobiles qui se connectent entre eux, avec des liens unis ou bidirectionnels.

Les hôtes peuvent se déplacer d'une façon libre.

- **La bande passante est limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un média de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.

- **Les contraintes d'énergies** : les hôtes fonctionnent grâce à une batterie dont la durée de vie est généralement limitée à quelques heures d'utilisation. donc, les communication doivent être réduites au strict minimum.

- ▶ **Une sécurité physique limitée** : le fait que tous les nœuds sont équivalents et potentiellement nécessaires au fonctionnement du réseau, cela impose une énorme sécurité dans le réseau Ad-hoc que dans les autres réseaux filaire.
- ▶ **L'absence d'infrastructure** : l'une des caractéristiques qui différencie entre les réseaux Ad-hoc et les autres réseaux mobiles est l'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administrateur centralisé.

1.2.2 Les applications des réseaux Ad-hoc

Les applications ayant recours aux réseaux Ad-hoc couvrent un très large spectre, incluant les applications militaires et de tactique, les bases de données parallèles, l'enseignement à distance, les systèmes de fichiers répartis, la simulation distribuée interactive et plus simplement les applications de calcul distribué.

D'une façon générale, les réseaux ad hoc sont utilisés dans toute application où le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignant, soit parce qu'il est difficile à mettre en place, soit parce que la durée d'installation du réseau ne justifie pas de câblage à demeure.

1.2.3 Les avantages

- ▶ **Faciles à déployer** : Il suffit de mettre en place plusieurs machines pour que le réseau existe. Ceci rend la construction d'un réseau Ad-hoc rapide et peu onéreuse.
- ▶ **Les nœuds sont mobiles** : L'absence de câblages autorise les nœuds à se déplacer l'un par rapport aux autres au cours du temps.
- ▶ **Evolutifs** : Pour ajouter un nœud à un réseau Ad-hoc préexistant, il suffit d'approcher le nouveau venu d'au moins l'un des membres du réseau. De même il suffit de l'éloigner pour le retirer du réseau.

1.2.4 Les inconvénients

- ▶ **Une bande passante limitée** : une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un média de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.
- ▶ **La contrainte d'énergie** : les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes donc restreintes, comme les batteries, par conséquent la durée de traitement est réduite. Donc le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout le contrôle fait par le système.

- **Une sécurité physique limitée** : réseaux mobiles Ad-hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie entre autres par les vulnérabilités des liens radio aux attaques, ainsi que les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.

1.3 Les réseaux de capteur sans fil

1.3.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un petit appareil autonome, capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat telles que la température, l'humidité, mesurer l'intensité lumineuse ou sonore, et il sert aussi à détecter, sous forme de signal souvent électrique, un phénomène physique afin de le représenter [3]. Ces capteurs possèdent également le matériel nécessaire pour effectuer des communications sans-fil par ondes radio [4].



FIGURE 1.2 – nœud capteur.

1.3.2 Architecture d'un capteur

Un capteur est composé principalement d'une unité de : captage, de traitement, de transmission, de stockage et d'énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application, comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (Global Positioning System), un générateur d'énergie (exemple : cellules solaire) ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer.

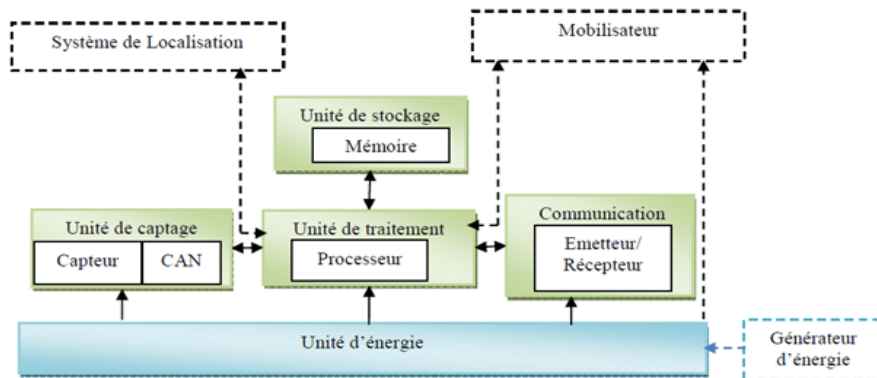


FIGURE 1.3 – Architecture d'un capteur [5]

- **Unité d'énergie**

Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants. Les batteries utilisées sont soit rechargeables ou non. Souvent, dans les environnements sensibles, il est impossible de recharger ou changer une batterie. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs[5].

- **Unité de captage**

La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Elle est composée de deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique /Numérique (CAN).Ce dernier transforme ces signaux en données numériques et les transmet à l'unité de traitement[6].

- **Unité de traitement**

L'unité de traitement exécute les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour effectuer la tâche assignée au réseau [7]. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique [8]. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission.

- **Unité de transmission**

Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil. Les différents choix de média de transmission incluent la Radiofréquence(RF), le Laser et l'Infrarouge [6].

- **Unité de stockage(Mémoire)**

L'unité de stockage inclut la mémoire de programme (dont les instructions sont exécutées par le processeur) et la mémoire de donnée (pour conserver des données fournies par l'unité de captage et d'autres données locales). La taille de cette mémoire est souvent limitée essentiellement par les considérations économiques et s'améliorera aussi probablement au fil des années[9].

1.3.3 Quelques capteurs existants



FIGURE 1.4 – Les types de capteur

Capteur	Type de capteur	Les caractéristiques
1	UCB WeC99"Smart Rock"	-Petite microcontrôleur : 8 kb code, 512 B données. -puissance minimal radio 10kb. -Stockage d'EEPROM (32KB).
2	Telos A	-Microcontrôleur : Texas-Instrument MPS430. -RAM : 2 KB. -ROM : 60KB. -Stockage : 256KB. -Puissance : 2 Batteries AA.
3	Photographie d'un MicaZ	-Microcontrôleur : Atmel Atmega 128l. -RAM : 4 KB. -ROM : 128 KB. -Stockage : 512KB. -Puissance : 2 Batteries AA.
4	Rockwell : WINS	-Microcontrôleur : 32KB. -RAM : 1MB bootable flash. -ARM Fort SA 1100, 32 bit RISC. - processor, 1MB SRAM, 4MB flash.
5	La MPR2600	-Frequency range : 2,4GHZ ISM band. -RAM : 4 KB. -Processor : Atmel Atmega 128l.
6	mica2	-Microcontrôleur : Atmel Atmega 128l. -RAM : 4KOctets. -ROM/Flash :128kOctets. -Flash externe : 512KB. -Processeur : Atmel AVR. Atmega 128 8-bit 8MHz.

TABLE 1.1 – différents types des capteurs

1.3.4 Définition d'un RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks; WSN) sont considérés comme un type spécial de réseaux Ad-hoc, composés d'un grand nombre de capteurs matériellement petits, et placés généralement près des objets auxquels ils s'intéressent dans les environnements où ils sont déployés. Ces capteurs sont capables de récolter, traiter et acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers des stations de collecte appelées nœuds puits ou stations de base [10].

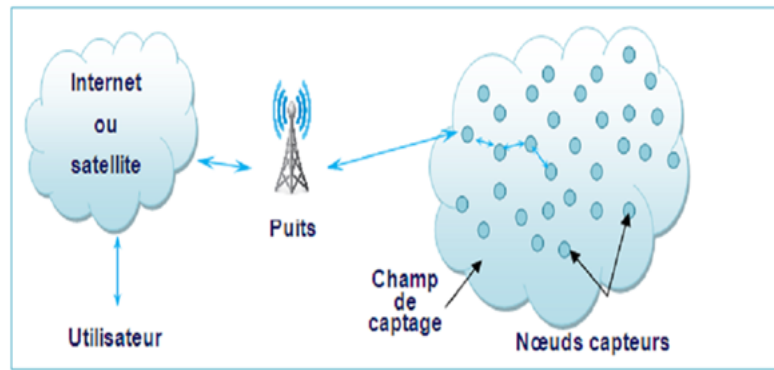


FIGURE 1.5 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil

1.3.5 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

- Applications militaires

Un réseau de capteurs déployé dans un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (alliés ou ennemis), ou d'analyser le champ de bataille avant d'y envoyer du renfort ([11,12]).



FIGURE 1.6 – Domaine militaire.

- **Applications médicales**

Le champ de contrôle de santé représente un grand marché pour les RCSF qui à tendance à croître très rapidement. Ces réseaux de capteur peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau en permettant, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur du corps humain [13].

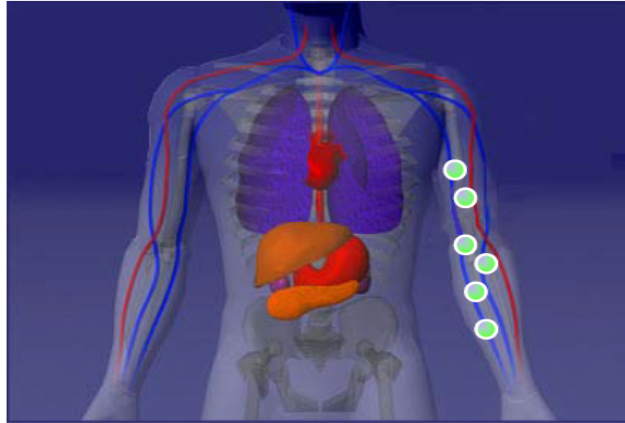


FIGURE 1.7 – Domaine médicale.

- **Applications environnementales**

Des capteurs de température peuvent être dispersés à partir d'avions dans le but de détecter d'éventuels problèmes environnementaux dans le domaine couvert par les capteurs dans une optique d'intervenir à temps afin d'empêcher que d'éventuels incendie, inondation, volcan ou tsunami ne se produisent [14].



FIGURE 1.8 – Domaine environnementale.

- **Applications commerciales**

Des nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées[15].



FIGURE 1.9 – Domaine commerciales.

1.3.6 Les caractéristiques des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil sont apparentés aux réseaux Ad-hoc. En effet, ces deux types de réseaux ont de nombreux points communs. nous citons quelques caractéristiques ci-dessous :

- ▶ **énergie et durée de vie**

Comme la seule source d'énergie d'un capteur est une batterie à durée de vie limitée, l'optimisation énergétique doit être prise en considération quelque soit le problème traité. En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si la perte de nœuds est très importante car ceci engendre des pertes de communications dues à une très grande distance entre les nœuds restants. Donc il est très important que les batteries durent le plus longtemps possible, étant donné que dans la plupart des applications il est impossible de retourner les changer.

- ▶ **Topologie dynamique**

La mobilité, l'apparition et la disparition des nœuds, la présence d'obstacles (arbres, bâtiments, etc.), les conditions environnementales (pluie, neige, etc.) et les interférences des ondes, sont tous des facteurs qui affectent la qualité de propagation des ondes émises et se manifestent comme des changements de topologie.

► Bande passante limitée

Le médium de communication sans fil a une capacité plus réduite que celui filaire. De plus, le débit effectif de la communication sans fil (avec prise en compte des effets du bruit, d'affaiblissement, des collisions, etc.) est souvent inférieur au débit maximal théorique. Une conséquence directe de la capacité relativement faible du médium sans fil, est bien la congestion facile du réseau.

► Sécurité limitée

Les réseaux de capteurs sans fil mobiles sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé [16].

► Auto configuration

Consiste avant tout à permettre la communication des nœuds, et donc l'affectation d'adresses aux interfaces réseaux, la diffusion des préfixes des sous réseaux et des passerelles d'interconnexion. Il s'agit ensuite de diffuser les informations comme le DNS(Dnergy Nware Souting) aux nœuds du réseau [16].

1.3.7 La Communication dans les réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs sans fil, La mobilité des nœuds n'admet aucune topologie fixe, pour cela les nœuds capteurs doivent graduellement établir sont infrastructure Cette infrastructure doit leur permettre de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, réagir aux données captées et transmettre ces données via une communication multi-sauts.

1.3.7.1 Types de communications dans les réseaux de capteurs

En générale, les données capturées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi sauts. Cette organisation logique implique quatre types de communications :

-La communication d'un nœud capteur à un nœuds capteur : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clustering ou le processus de création de route[17].

-La communication d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire : les données capturées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.

-La communication d'un nœud intermédiaire à un nœud capteur : les requêtes et la signalisation des messages, sont souvent multicast, elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires, pour atteindre un sous-ensemble des nœuds immédiatement.

-La communication nœud intermédiaire à un nœud intermédiaire : la communication entre ces nœuds peut être dans la plupart du temps unicast. sachant que chaque nœud est équipé d'une radio d'émission / réception [18].

1.3.7.2 La pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par le nœud puits ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure. Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs [19].

Elle est composée de la couche application, transport, réseau, liaison de données, physique, ainsi que de trois niveaux qui sont : le niveau de gestion d'énergie, de gestion de tâches et le niveau de gestion de mobilité.

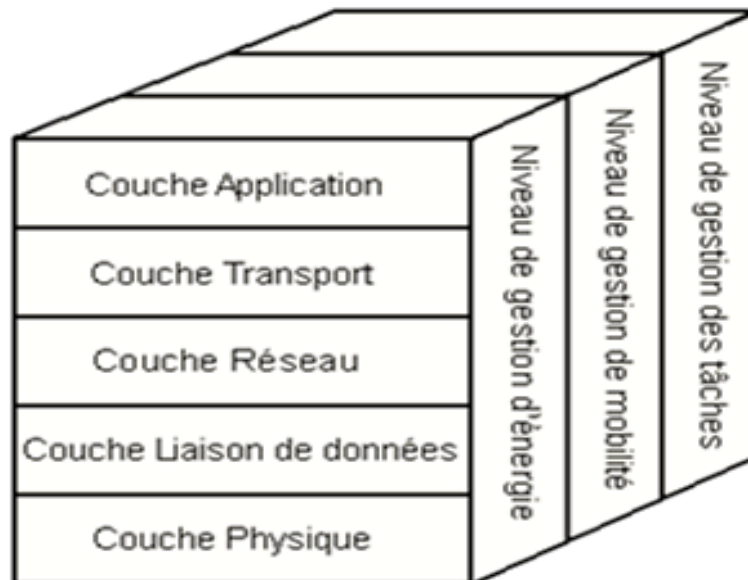


FIGURE 1.10 – Pile Protocolaire dans les réseaux de capteur [4].

- **Le niveau de gestion d'énergie**

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs, dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de captage[20].

- **Le niveau de gestion de mobilité**

Ce niveau détecte et enregistre tout les mouvements des nœuds capteurs, d'une manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image

récente sur les nœuds voisins, cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [18].

- **Le niveau de gestion des tâches**

Lors d'une opération de captage dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme, cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans la quelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [19].

- **La couche application**

Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, gère directement par les logiciels.

- **La couche Transport**

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.

- **La couche Réseau**

Cette couche permet de gérer l'adressage et le routage des données, c'est-à-dire leur acheminement via le réseau.

- **La couche de liaison de données**

Cette couche est responsable du multiplexage des flux de données, la détection des trames, le contrôle des accès au support de transmission et le contrôle des erreurs. Elle garantit également des connexions point-à-point ou point-à-multipoints fiables durant le processus de communication entre les nœuds capteurs. En effet, cette couche est composée de la couche de contrôle de liaison logique (LLC pour Logical Link Control) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments de messages de la couche réseau avec des informations d'entête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au medium (MAC pour Medium Access Control) qui contrôle la radio.

- **La couche Physique**

Cette couche doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste.

1.3.8 Facteurs et contraintes de conception des RCSF

La conception des RCSF est influencée par plusieurs contraintes qui peuvent être conceptuelles comme la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environne-

ment ou matérielles comme la puissance de calcul. En effet, ces facteurs désignent l'architecture des réseaux de capteurs ainsi que le choix des protocoles à implémenter :

1. La tolérance aux pannes

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 ne doivent pas affecter le fonctionnement de tout le réseau de capteur, c'est le principe de la tolérance de fautes. La tolérance de fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs [21].

2. L'extensibilité (passage à l'échelle)

L'une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir des centaines ou des milliers de nœud capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs [5].

3. L'environnement)

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

4. La consommation d'énergie

L'économie d'énergie est l'une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, dans la plupart des cas le remplacement ou la recharge des sources d'énergie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend de la durée de vie de sa batterie. Cette énergie est consommée par les différentes unités du capteur afin de réaliser les tâches de captage, traitement de données et de communication, Il faut donc que les capteurs économisent au maximum leur énergie.

5. Puissance de calcul

Les processeurs des réseaux de capteurs sont différents de ceux d'une machine classique. car ils utilisent souvent des microcontrôleurs de faibles fréquences [5].

6. Coût de fabrication

Le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût globale du réseau. Il faut donc que le coût de fabrication de ces nœuds ne soit pas supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classique afin de pouvoir justifier son intérêt [5,22].

6. Agrégation des données

Puisque les nœuds capteurs peuvent produire des données significatives et superflues, les paquets semblables des différents nœuds peuvent être agrégés de sorte que le nombre de transmissions soit réduit. L'agrégation de données est la combinaison des données de différentes sources selon une certaine fonction d'agrégation : suppression, minimum, maximum et moyenne, etc. Cette

technique a été employée pour optimiser la consommation d'énergie lors de transfert des données dans un certain nombre de protocoles de routage. Des méthodes de traitement des signaux peuvent également être employées pour l'agrégation des données. Dans ce cas, elle est désignée sous le nom de la fusion de données où un nœud est capable de produire un signal de sortie en employant certaines techniques, telles que beamforming pour combiner les signaux entrants et réduire le bruit dans ces signaux [23, 24].

1.3.9 La comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc

-Les réseaux de capteurs utilisent principalement les communications broadcast alors que la plupart des réseaux Ad-hoc sont basés sur la communication point à point.

-Les nœuds capteurs sont caractérisés par des ressources plus limitées (ressource d'énergie, puissance de calcul et mémoire). Les nœuds dans un MANET sont plus puissants et possèdent des capacités beaucoup plus importantes.

-Le nombre de nœuds dans un réseau de capteur peut-être beaucoup plus important que les réseaux Ad-hoc (forte scalabilité).

-Les entités d'un réseau MANET sont souvent gérés directement par des être humains, comme les portables, les PDA, etc. dans les réseaux de capteurs sans fil les entités interagissent essentiellement la nature ou l'environnement ou entre elles.

-La topologie des capteurs change fréquemment du fait des pannes des nœuds ou de leur mobilité.

-Les nœuds capteurs ne possèdent aucune identification(ID) globale tel que les adresses IP dans les réseaux Ad-hoc.

-les deux réseaux sont des réseaux qui fonctionnent sans infrastructure.

-Dans un MANET tous les nœuds sont égaux, de ce fait la panne de n'importe quel nœud a la même importance, tandis qu'un WSN est plus sensible à la panne des nœuds puits qu'à celle des capteurs [25].

1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue globale sur les réseaux de capteurs sans fil qui présentent un intérêt considérable vu à l'évolution connue récemment dans ce domaine. Par conséquent, nous avons remarqué que ces réseaux ont plusieurs contraintes, dont le problème majeur est la consommation d'énergie.

Dans le prochain chapitre nous allons définir les différentes classifications des protocoles de routage.

CHAPITRE 2

ROUTAGE DANS LES RÉSEAU DE CAPTEUR SANS FIL(RCSF)

2.1 Introduction

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les nœuds sont déployés dans des environnements hostiles, afin de collecter des informations, et de les envoyer vers la station de base, en utilisant des protocoles de routage. En effet, le principal objectif du routage est de trouver un chemin optimal minimisant la consommation d'énergie augmentant ainsi la durée de vie du réseau. De ce fait, les protocoles élaborés doivent assurer une consommation minimale d'énergie tout en maintenant le bon fonctionnement du réseau et sans dégrader ses performances.

Dans ce chapitre, nous allons définir quelque contrainte de routage dans les réseaux de capteur sans fil, ensuite les classifications des protocoles de routage dans RCSFs. par suite les métriques de mesures de l'efficacité des protocoles de routage dans les RCSFs.

2.2 Les facteurs et les contraintes du routage dans les RCSFs

Les principaux facteurs et contraintes qui influencent sur les réseaux de capteurs peuvent être classés commse suit :

2.2.1 Déploiement des capteurs

Le déploiement des capteurs a une grande importance dans le domaine des applications réseau, ces nœuds peuvent être déployés d'une manière déterministe ou aléatoire :

- Le déploiement déterministe : les capteurs sont placés manuellement et les données sont acheminées par des routes prédéterminées et fixes.
- Le déploiement aléatoire : les capteurs sont propagés aléatoirement et les données sont routées

suivant des chemins dynamiques afin de bénéficier d'une meilleure connectivité et d'optimiser la consommation énergétique.

2.2.2 Topologie dynamique

Les réseaux de capteurs peuvent être dynamiques ou statiques. Dans les réseaux de capteurs statiques, les composants demeurent stationnaires. C'est habituellement le cas dans la plupart des réseaux de capteurs, par exemple pour surveiller la température ou l'humidité d'une salle ou bien d'une région. Dans les réseaux de capteurs dynamiques, au moins l'un des composants est mobile, exemple un mouvement détectant le système de sécurité [26].

2.2.3 Tolérances aux pannes

Ce facteur est défini par la capacité d'un réseau de capteur de maintenir son bon fonctionnement malgré la présence de quelques défaillances. Ces derniers peuvent survenir par manque d'énergie ou en raison de dommages physiques ou d'interférences environnementales.

En effet, la panne de quelques nœuds entraîne la perte des liens de communication et ainsi un changement significatif dans la topologie du réseau. Le degré de tolérance dépend du degré de criticité de l'application et des données échangées. Afin de maintenir le bon fonctionnement du réseau, les protocoles conçus doivent alors s'adapter à la nouvelle topologie du réseau en formant de nouvelles routes entre les nœuds [27].

2.2.4 Qualité de service (QOS)

Dans quelques applications, les données devraient être fournies au cours de certaines périodes du moment où elles sont senties, sinon ils sont inutiles, et par conséquent, la latence définie pour la livraison des données est une autre condition pour les applications qui sont soumises sous des contraintes du temps. Cependant, dans plusieurs applications, la conservation d'énergie, qui est directement liée à la durée de vie du réseau est considérée relativement plus importante que la qualité des données envoyées. Pendant que l'énergie s'épuise, le réseau exige de réduire la qualité des résultats afin de réduire la diminution d'énergie dans les nœuds, et par conséquent augmenter la durée de vie du réseau [23].

2.2.5 La consommation d'énergie

Les nœuds capteurs peuvent utiliser leur approvisionnement en énergie pour calculer et transmettre l'information dans un environnement sans fil. Pour cela, les techniques de conservation d'énergie lors de la communication et le calcul sont essentielles. En effet, la durée de vie d'un nœud capteur a une forte dépendance avec la durée de vie de la batterie [28]. Dans un réseau

de capteurs multi-sauts, chaque nœud joue un rôle dual comme un expéditeur et un routeur de données. Le mal-fonctionnement de quelques nœuds capteurs dû à la défaillance (à cause de la diminution totale d'énergie) peut causer les changements topologiques cruciaux et peut exiger le déplacement des paquets ainsi que la réorganisation du réseau [23].

2.2.6 Agrégation des données

Un nouveau paradigme, que les protocoles de routage doivent prendre en compte, est l'agrégation de données. Ce dernier consiste en un ensemble de méthodes automatisées qui combinent les données provenant des différents nœuds sources en un ensemble d'informations significatives. Cette technique permet d'éliminer la redondance dans les données capturées, et minimiser le nombre de transmissions possibles, afin d'économiser la quantité d'énergie consommée [29].

2.3 La classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Les protocoles de routage peuvent être classés selon plusieurs critères, comme le montre le schéma suivant :

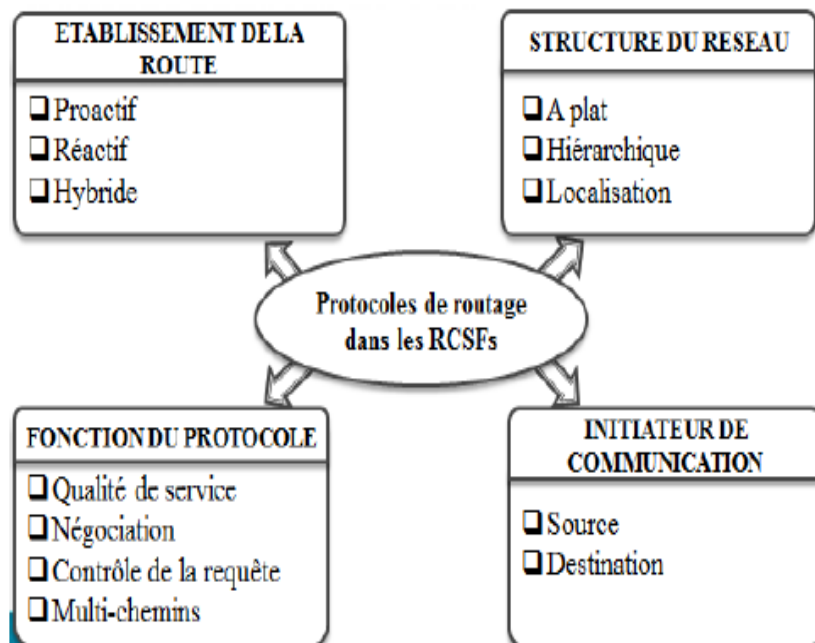


FIGURE 2.1 – Les types de classification des approches dans les réseaux de capteur sans fil.

2.3.1 Classification selon la structure du réseau

Dans cette section la classification des protocoles se base sur la topologie du réseau, cette topologie joue un rôle significatif dans le fonctionnement du réseau. Parmi ses catégories : le routage à plat, le routage hiérarchiques et le routage basé sur la localisation géographique.

2.3.1.1 Routage à plat

Dans le routage à plat, les nœuds ont tous le même fonctionnement pour la collection des données et l'acheminement de ces informations. Pour accomplir cette tâche les nœuds ont besoin juste de connaître leurs voisins, ce qui facilite la communication. Les données seront transmises en utilisant des sauts multiples comme c'est montré dans le schéma suivant :

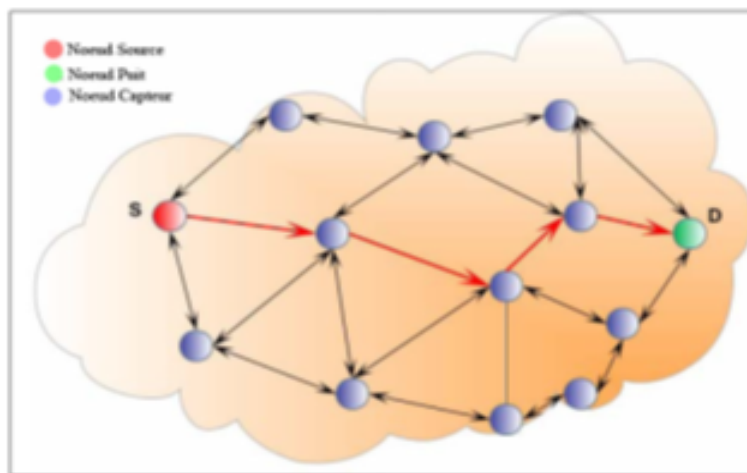


FIGURE 2.2 – topologie à plat.

Vu le nombre important de nœud utilisés, il est presque infaisable d'assigner un identificateur à chaque nœud. De même, les nœuds autour de la station de base épuiseront leurs sources d'énergie plus tôt que les autres nœuds, dû au fait que tout le trafic transite par les nœuds entourants la station de base.

Nous citons ci-dessous quelques exemples :

- **Gossiping**

Gossiping [4] est une version modifiée du Flooding, dans laquelle les nœuds ne diffusent pas les paquets reçus mais les transmettent à un de leurs voisins qui sont Sélectionnés de façon aléatoire. Le Gossiping évite le problème de l'implosion en choisissant un nœud aléatoire pour envoyer le paquet plutôt que de le diffuser. Cependant, cette méthode génère un retard dans la propagation des données dans les nœuds.

Discussion

Malgré que l'approche évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud, elle prend beaucoup plus de temps pour propager les messages dans tout le réseau.

• (RR) Routage par Rumeur

Dans les protocoles de routage par rumeur [32], Les requêtes peuvent être acheminés aléatoirement jusqu'à ce qu'elles trouvent le chemin de l'événement au lieu d'utiliser l'inondation à travers le réseau.

L'algorithme de routage par rumeur emploie un ensemble d'agents à longue vie, un agent est un paquet avec une grande portée qui traverse le réseau et informe de nœud en nœud en informant ces nœuds des événements qu'il a rencontrés durant toute cette traversée.

Chaque nœud maintient une liste de ses voisins et une table d'événements, et quand il rencontre un événement il l'ajoute à sa table d'événements et génère un agent. Ce dernier a une durée de vie limitée. Lorsqu'un nœud veut transmettre une requête, il utilise un acheminement au hasard. Mais si ce nœud arrive à savoir que sa requête n'a pas atteint la destination, il va inonder le réseau.

Discussion

le routage par rumeur réalise une économie significative d'énergie par rapport à l'inondation par événement et peut également assurer la maintenance du routage.

Cependant, ce type de routage n'est efficace que lorsque le nombre d'événements est petit. Pour un grand nombre d'événements, le coût de maintien des agents et des tables d'événements dans chaque nœud ne peut pas être compensé s'il n'y a pas assez d'intérêt sur ces événements de la part d'un destinataire.

2.3.1.2 Routage Hiérarchique

Les différents protocoles de routage hiérarchique se basent sur le clustering. Le but principal de cette approche est de réduire la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs et de prolonger la durée de vie du réseau. Pour se faire, chaque cluster a un nœud appelé cluster head. Seul ce dernier peut communiquer avec les autres nœuds ou avec la station de base, de telle sorte que Tous les nœuds d'un cluster envoient les données au cluster head. Ensuite ce dernier s'en charge des routes vers d'autres cluster head ou bien vers la station de base.

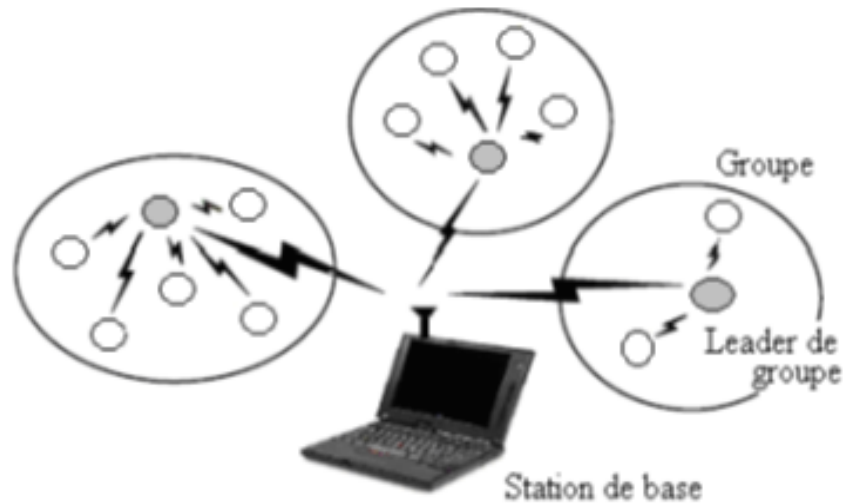


FIGURE 2.3 – Topologies hiérarchique .

- **HEED (Hybrid, Energy-Efficient Distributed clustering in Ad-hoc Sensor Networks).**

HEED [30] est un protocole basé sur LEACH avec quelques différences. En particulier pour HEED, une fonction de coût est introduite pour chaque capteur et est annoncée aux voisins. Le choix d'un routeur ne s'effectue donc plus par la sélection du routeur dont la puissance de réception du signal est la plus forte : on choisit le routeur dont la fonction de coût est minimale. La fonction de coût peut par exemple être le nombre de voisins d'un nœud pour distribuer la charge sur les capteurs (ou l'inverse du nombre de voisins pour obtenir des grappes denses). Une méthode probabiliste avec itération est également utilisée pour l'auto-élection des routeurs, mais avec considération de l'énergie résiduelle de chaque capteur. A la première itération, pour chaque capteur i le seuil d'éligibilité est fixé à :

$$CH_i^{\text{prob}} = \max(C_i * (\frac{E_{\text{prob}}}{E_{\text{max}}}) * P_{\text{min}}) \quad (2.1)$$

Où C_{prob} est le ratio recherché de routeurs sur le réseau, E_i l'énergie résiduelle du capteur i et p_{min} une probabilité minimale d'éligibilité pour assurer la terminaison de l'algorithme (pour éviter un nombre infini d'itérations). A chaque itération, CH_{prob} est multiplié par 2 (pour atteindre un maximum de 1 où le capteur est garanti d'être élu routeur). Des tests réalisés par les concepteurs de HEED [30] montrent que pour certaines situations, l'autonomie d'un réseau de capteurs (temps avant l'indisponibilité du premier capteur par insuffisance d'énergie) est plus que doublée par rapport à LEACH.

A première vue, HEED s'avère plus adapté, par la prise en compte de l'énergie résiduelle des capteurs, pour des réseaux de capteurs d'énergie résiduelle hétérogène.

Discussion

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. L'étendue du réseau est posée comme un problème de ce protocole pour les réseaux à grande échelle. Vu la stratégie adoptée pour la communication entre les CHs et la SB qui se fait via un seul saut.

- **PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Informations System).**

PEGASIS [33] est un autre protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs, il a été proposé comme amélioration du protocole LEACH. Dans ce protocole, un nœud peut seulement communiquer avec son voisin le plus proche, et doit attendre son tour pour pouvoir transmettre à la station de base. La motivation principale de ce protocole, consiste à prolonger la durée de vie des nœuds capteurs et réduire la bande passante consommée en utilisant la collaboration locale entre les nœuds et en tolérant la défaillance des nœuds capteurs.

Initialement, le nœud capteur doit trouver son voisin le plus proche par l'envoi d'un signal et l'atténuation graduelle de ce dernier, jusqu'à ce qu'il soit reçu par un seul nœud. Les données captées sont transmises à la station de base en utilisant la fusion qui combine deux paquets de données ou plus et les envoie dans un seul paquet, ce qui est similaire au protocole LEACH. L'idée clef de PEGASIS est de former une chaîne entre les nœuds d'une telle façon que chaque nœud envoie et reçoit les données seulement de son voisin le plus proche.

Les données fusionnées sont transmises à la station de base par un nœud désigné. Parmi les membres de la chaîne, les autres nœuds prendront leurs tours pour accomplir cette tâche, réduisant ainsi la quantité d'énergie consommée par round.

Discussion

PEGASIS élimine le surcoût causé par le processus de formation des clusters, et limite le nombre de transmissions et de réceptions entre les nœuds. Cependant, ce protocole est adapté seulement aux capteurs sans fil dont les nœuds sont immobiles, et le problème des points chauds (Hot spots).

2.3.1.3 Routage basés sur la localisation géographique

La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En général, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée.

Puisque il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en termes d'énergie. Par exemple, si la région à servir est connue en utilisant la localisation des

nœuds capteurs pour diffuser la requête seulement à cette région particulière, alors il est facile d'éliminer le nombre de transmissions de manière significative [34,35].

• GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) [36] est un protocole de routage basé sur la localisation, efficace en consommation d'énergie. GAF conserve l'énergie en éteignant les nœuds inutiles dans le réseau sans affecter le niveau de fidélité de routage. Il forme une grille virtuelle pour la zone couverte. Chaque nœud utilise un GPS pour indiquer sa position et s'associer à un point de la grille virtuelle. Les nœuds se trouvant dans la même zone de la grille sont considérés équivalents en termes de coût lié au routage des paquets. Alors, l'équivalence est exploitée en maintenant quelques nœuds situés dans une zone de grille à l'état de sommeil afin d'économiser l'énergie. GAF peut sensiblement augmenter la durée de vie du réseau au fur et à mesure que le nombre de nœuds augmente.

Dans la figure, le nœud 1 peut atteindre 2, 3, 4 et 5. Les nœuds 2, 3, 4 et 5 peuvent atteindre à leur tour le nœud 6. Donc, les nœuds 2, 3, 4 et 5 sont équivalents, et trois d'entre eux peuvent dormir. Il y a trois états définis dans GAF :

- ▶ **discovery** : pour déterminer les voisins dans la grille.
- ▶ **Active** : participation reflétant au routage.
- ▶ **sleep** : quand la radio est éteinte.

Afin de gérer la mobilité, chaque nœud estime son temps de quitter la grille et envoie ceci (l'estimation) à ses voisins. Les voisins de sommeil ajustent leur temps de sommeil pour maintenir la fidélité de routage. Avant l'expiration du temps d'un nœud actif, les nœuds de sommeil se réveillent et l'un d'entre eux devient actif. GAF est un protocole basé sur la localisation, il peut également être considéré comme hiérarchique.

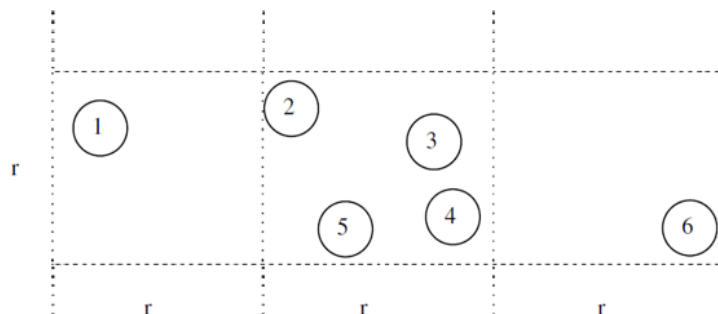


FIGURE 2.4 – le protocole GAF.

Discussion

Le protocole GAF prend en charge la mobilité des nœuds et essaye de maintenir la connectivité du réseau en laissant un nœud représentatif à l'état actif dans chaque zone de la grille virtuelle. Les résultats de simulation [36] ont montré que ses performances en termes de délais de transmission et perte de paquets sont comparables à celles d'un acheminement ordinaire dans les réseaux Ad-hoc, cependant une amélioration est constatée quant à la durée de vie globale du réseau. Bien que GAF est basé sur la localisation, ce protocole peut être considéré également comme hiérarchique où la formation des groupes (zones de la grille) est basée sur les positions des nœuds. Pour chaque zone particulière de la grille, le nœud actif agit comme un leader de groupe responsable de la transmission des données vers d'autres nœuds du réseau.

• GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)

Le protocole GEAR [38] utilise une sélection heuristique basée sur des informations géographiques sur les nœuds voisins pour router les paquets aux destinations. L'idée de base est de restreindre le nombre de requête en considérant seulement certaines régions plutôt que les diffuser dans le réseau entier. Dans GEAR, chaque nœud conserve un coût d'estimation et un coût d'apprentissage.

Le coût d'estimation combine l'énergie résiduelle et la distance vers la destination.

Le coût d'apprentissage est un raffinement du coût d'estimation qui prend en compte le routage autour des trous dans le réseau. Un trou apparaît quand un nœud n'a pas de voisins proches vers la destination.

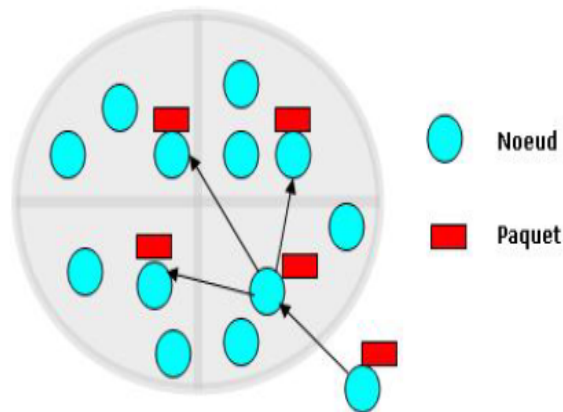


FIGURE 2.5 – Transmission géographique récursive dans GEAR [39].

Discussion

GEAR non seulement réduit la consommation d'énergie pour établir les routes, mais fournit de meilleures performances en termes de livraison de paquets. Par contre, si on a une grande densité de nœuds, le schéma récursif est très coûteux.

2.3.2 Classification selon les fonctions des protocoles

Dans cette section, les protocoles de routage peuvent être classifiés en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Quality of Service "QoS" based routing), routage basé sur le flux de données dans le réseau (Network flow based routing), routage basé sur des multi-chemins (Multi-path based routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing).

2.3.2.1 Routage basé sur le multi-chemin

Cette catégorie utilise de multiples chemins au lieu d'un seul. Ce qui augmente les performances du réseau.

Lors de la défaillance d'un chemin primaire, les données vont être acheminées vers la destination via des chemins alternatifs.

2.3.2.2 Routage basé sur la négociation

Dans ce type des protocoles utilisent des descripteurs de données de haut niveau (métadonnées) afin de décrire la donnée avant de l'émettre. Ainsi, le récepteur éventuel peut décider de recevoir ou pas le paquet. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

• SPIN (Sensor Protocols For Information via Negotiation)

Le protocole SPIN repose sur deux idées fondamentales. D'abord, pour un bon fonctionnement avec économisations d'énergie, les capteurs doivent communiquer avec les autres au sujet des données qu'ils ont déjà et les données qu'ils doivent obtenir.

D'autre part, les nœuds dans un réseau doivent surveiller et s'adapter aux changements de leurs propres ressources énergétiques pour prolonger la durée de vie opérationnelle du système.

Les capteurs utilisent des méta- données pour décrire les données collectées.

SPIN utilise trois types de messages :

- Message d'ADV pour permettre à un nœud d'annoncer des métadonnées particulières.
- Message de REQ pour demander des données spécifiques.
- Message de données (DATA) qui portent les données réelles.

La figure 1 récapitule les étapes du protocole SPIN. Donc pour étape 1, le nœud A annonce ses données au nœud B. et dans l'étape 2, le nœud B répond à A par un message REQ on lui demandant les données dont il en a besoin.

De même pour les étapes 3 et 4, après la réception des données demandées, le nœud B diffuse un message d'annonce à ses voisins, et comme le montre les étapes 5 et 6, seuls les nœuds intéressés par la donnée annoncée qui envoient à leur tour des requêtes au nœud B et auront une copie.

La famille SPIN inclut beaucoup de protocoles. Ces derniers sont : SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC et SPIN-RL [37].

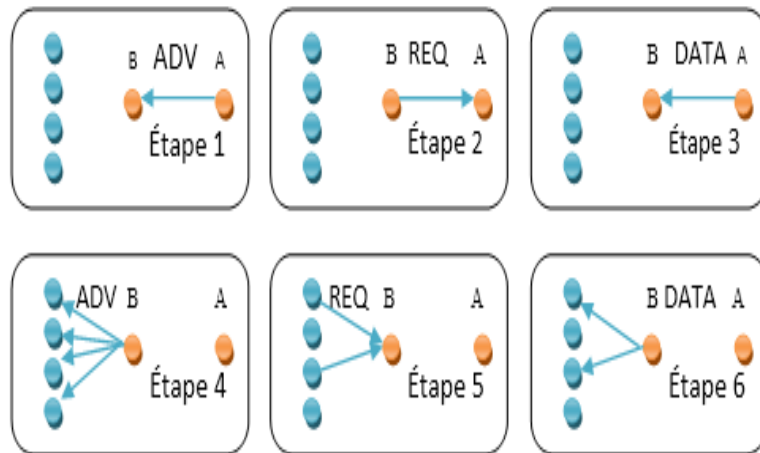


FIGURE 2.6 – Protocole de SPIN.

Discussion

L'un des avantages majeurs du protocole SPIN dérive de son traitement localisé de l'information, où chaque nœud n'a besoin de connaître que ses voisins immédiats uniquement, ceci permet de préserver les mêmes performances lors d'un changement fréquent de la topologie du réseau.

Comparé à la technique d'inondation, SPIN diminue l'énergie dissipée, de plus, le mécanisme de négociation lui permet de réduire le taux de données redondantes transmises de moitié. Cependant le mécanisme d'annonce (via les messages ADV) ne peut garantir un cheminement fiable de données vers la destination. Ceci peut particulièrement se produire quand les nœuds intéressés par les données se trouvent relativement loin du capteur source, et les nœuds entre la source et la destination ne sont pas intéressés par la donnée. Par conséquent, SPIN, ne peut être un choix convenable pour les applications qui exigent un acheminement efficace des données captées, telles que les applications militaires.

2.3.2.3 Routage basé sur QOS

Dans ce type de routage, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire une certaine métrique de QoS, par exemple : largeur de la bande passante [40, 41].

- **SAR (Sequential Assignment Routing)**

Le protocole SAR proposé dans [40] est l'un des premiers protocoles de routage pour les RCSFs qui introduit la notion de qualité de service dans les décisions de routage. SAR crée des arbres en prenant en compte les trois facteurs : les métriques QoS, la source énergétique sur chaque chemin

et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant ces arbres, des routes multiples du sink au capteur sont formées. Une approche multi-chemins est utilisée pour éviter les messages de contrôle qui peuvent résulter de la ré-estimation des routes quand celles employées deviennent défectueuses, dès lors, un schéma de restauration de chemins est utilisé.

L'objectif de l'algorithme SAR est de minimiser la valeur moyenne de la métrique de QoS pondérée tout au long de la durée de vie du réseau.

Discussion

Les résultats de simulation [40] pour SAR ont montré que ce protocole requiert une quantité d'énergie plus faible que ceux basés sur la métrique de consommation d'énergie minimum, qui se focalisent seulement sur la consommation d'énergie de chaque paquet sans la prise en compte de son niveau de priorité.

SAR offre des avantages comme la tolérance aux pannes et recouvrement rapide des chemins défectueux. Cependant, ce protocole souffre de l'overhead immense dû à la maintenance des tables et des états au niveau de chaque nœud, particulièrement quand le réseau englobe un grand nombre de capteurs.

2.3.2.4 Routage basé sur le flux de données

Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flux représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds [42].

2.3.3 Classification Selon l'établissement de route

Les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles réactifs, les protocoles proactifs et les protocoles hybrides.

2.3.3.1 Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs établissent au préalable (condition) des meilleurs chemins pour chaque nœud vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud de réseau. Après ça chaque nœud crée une table de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des chemins. Ainsi, Les protocoles proactifs sont adaptés à l'application qui nécessite un prélèvement périodique des données. Ainsi, les routes sont établies à priori, ce qui facilite l'acheminement des données. Mais le problème qui se pose est la mise à jour de ces tables de routage. En effet, cette dernière est assurée par la diffusion périodique de paquets de contrôle dans le réseau, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux de grande taille [43].

2.3.3.2 Protocoles réactifs

Les protocoles de routage réactifs (à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée. Ainsi, les protocoles réactifs offrent une meilleure conservation d'énergie par rapport aux protocoles proactifs. Néanmoins, le routage à la demande induit une lenteur à cause de la recherche des chemins et une impossibilité de connaître au préalable la qualité du chemin (en terme de bande passante, délais, . . .) [43,44].

- **ACQUIRE (Active Query forwarding In sensor Networks)**

Dans [64], les auteurs ont proposé une technique pour interroger les réseaux de capteurs appelé ACQUIRE "Active Query forwarding In sensor Networks". Cet algorithme considère le réseau comme une base de données distribuée où des requêtes complexes peuvent être subdivisées en plusieurs sous-requêtes. Pour obtenir une information dans le réseau, une requête active est acheminée de bout en bout. Cette requête est considérée comme active puisque chaque nœud intermédiaire recevant la requête essaye d'y répondre d'une manière partielle, en utilisant les données disponibles dans son propre cache. La requête est par la suite envoyée aux nœuds voisins. Si les données disponibles ne sont pas à jour, le nœud collecte de nouvelles informations à partir des voisins qui se trouvent dans un périmètre de d sauts. Une fois la requête totalement traitée, elle est renvoyée à la station de base via la route inverse ou le chemin le plus court.

2.3.3.3 Protocoles hybride

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage. Ainsi, ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes [45].

2.3.4 Classification selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut se faire par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires :

2.3.4.1 Communication lancée par la source

Dans les protocoles lancés par la source, les nœuds envoient des données à la destination. Ces protocoles utilisent les données rapportées en fonction du temps (time-driven) ou d'événements (event-driven). Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds perçoivent certains événements.

2.3.4.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles de communication lancée par la destination utilisent les données rapportées avec query-driven, et dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région [46].

2.4 Le tableau donne un petit aperçu sur la classification de quelques protocoles de routage dans les RCSFs

Les protocoles	classification	Mobilité	Basé sur la négociation	Agrégation des données	Multi chemin	Utilisation d'énergie
RR	A plat	Oui	Non	Oui	Non	Min
Gossiping	A plat	Limitée	Non	Non	Non	Min
HEED	Hiérarchique	Sb Fixe	Non	Oui	Non	Max
PEGASIS	Hiérarchique	Sb Fixe	Non	Oui	Non	Max
GAF	Géographique	Limitée	Non	Non	Non	Limitée
GEAR	Géographique	Limitée	Non	Non	Non	Limitée
SPIN	A plat	Possible	Oui	Oui	Oui	Limitée
SAR	Qualité deservice	Limitée	Non	Non	Oui	Limitée
ACQUIRE	A plat	Limitée	Non	Oui	Non	Limitée

TABLE 2.1 – Classification et comparaison des protocoles de routages dans les réseaux de capteurs.

2.5 Métriques de mesure d'efficacité des protocoles de routage

Dans cette section, nous allons présenter les métriques pour mesurer l'efficacité des protocoles de cheminement de données dans les réseaux de capteur sans fils. Un calcul de métrique est un algorithme qui traite le cout associe à chaque chemin de routage. Les protocoles de routage permettent aux nœuds de comparer les métriques calculées afin de déterminer les routes optimales à emprunter. Un calcul de métrique est un algorithme qui traite le coût associé chaque chemin de routage. Les protocoles de routage permettent aux nœud de Comparer les métriques calculées afin de déterminer les routes optimales à emprunter. Comme la métrique est optimale alors le protocole de routage considère que la probabilité que les données arrivent intactes et dans un minimum de temps au nœud puits, à travers certains noeuds intermédiaires, est grande. Plusieurs métriques

peuvent affecter le routage en termes d'énergie, délai, longueur du chemin, etc.

Les métriques de routage peuvent être classées en deux types :

2.5.1 métriques applicables à toutes les architectures des RCSFs

2.5.1.1 Le nombre de sauts "Hop-count"

Les protocoles de routage utilisent cette métrique pour minimiser le nombre de sauts pendant le routage. L'idée est de calculer le nombre de nœuds intermédiaires pouvant être traversés lors d'une transmission d'un paquet du nœud source vers le nœud puits. La route choisie est celle qui contient un nombre minimum de sauts (notons que le nombre de sauts est généralement relatif au nombre de nœuds parcourus).

2.5.1.2 Perte de paquets

Les protocoles de routage utilisent cette métrique dans le but de minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis une source vers une destination pendant le routage [1]. L'idée est de calculer le ratio des paquets perdus et des paquets émis transitant dans le réseau. Autrement dit, on calcule le nombre de paquets perdus sur le nombre de paquets transmis lors d'une transmission. Dans le cas où le taux de perte de paquets est élevé, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes qui permettent de minimiser cette perte.

2.5.1.3 Le temps de traverser un saut "Per hop round trip time"

Cette métrique mesure le temps d'aller-retour des requêtes envoyées aux nœuds voisins. Cette métrique peut être calculée en ayant un nœud qui va envoyer des paquets de requête avec un estampille (timestamped) à l'un de ses voisins avec un intervalle de temps. Quand le voisin reçoit le paquet, il le transmet de nouveau à l'expéditeur. En comparant le timestamped avec la durée du retour, la qualité du lien peut être évaluée. Naturellement, les résultats de ce test peuvent être altérés par le temps d'attente (Queuing Delay) ou la Charge sur les deux nœuds [47].

2.5.1.4 Délai de bout-en-bout "EED"

L'EED (End-to-End Delay) est le temps moyen nécessaire pour qu'un paquet de Données soit acheminé à partir de la source vers la destination [1]. Cette technique est parmi les métriques les plus connues dans les réseaux sans fil. Les protocoles de routage l'utilisent pour minimiser le temps de propagation des paquets de données échangés pendant le routage.

2.5.2 métriques significatives seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie

2.5.2.1 La notion de coût "Cost Awareness"

"Cost awareness" représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie dans le routage dans laquelle nous essayons de prolonger au maximum la durée de vie d'un nœud. Les choix des opérations de routage que le nœud fera sont une fonction relative à son énergie de batterie restante. Afin d'utiliser "cost awareness" en tant qu'une métrique, on doit calculer la quantité d'énergie consommée pour chaque route imposée au réseau. Plus la consommation d'énergie est minime plus les tâches de routage peuvent être accomplies par le réseau/nœud avant qu'il soit défaillant [48].

2.5.2.2 La notion de puissance "Power Awareness"

"Power Awareness" représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie. Elle essaye de réduire au minimum l'énergie totale qui a été dépensée lors de l'envoi d'un message depuis sa source à sa destination [48]. Afin d'utiliser "power awareness" en tant qu'une métrique, on doit attribuer un poids, basé sur la distance, sur chaque saut possible entre les nœuds du réseau.

2.5.2.3 La notion de coût-puissance

Cette métrique est la combinaison des deux métriques précédentes. Elle vise à réduire au minimum l'énergie consommée dans tout le réseau et en même temps elle évite qu'un nœud ait une quantité d'énergie limitée [48].

2.5.2.4 Le temps du premier nœud à mourir

Cette métrique détermine le temps auquel le premier nœud épuise complètement son énergie. Elle n'est pas concernée par la défaillance d'un nœud dû aux raisons techniques.

2.5.2.5 Le temps du dernier nœud à mourir

Elle détermine le temps où le dernier nœud du réseau a consommé toute son énergie.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons constatés que la plus part des approches dans les réseaux de capteurs sans fil sont basés sur la contrainte d'énergie. Et cela dû à la limitation de leurs ressources énergétiques. Dans le prochain chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les protocoles de routage hiérarchiques.

CHAPITRE 3

ÉTAT DE L'ART SUR LES PROTOCOLES DE ROUTAGE HIÉRARCHIQUE DANS LES RCSFS

3.1 Introduction

L'énergie est une contrainte majeure dans les réseaux de capteurs sans fil, sachant que les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries ayant une capacité limitée, et ces nœuds sont déployés dans des zones inaccessibles, il est difficile de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, cette contrainte a influencé négativement sur la durée de vie du réseau. D'où la majorité des recherches se concentrent principalement sur les moyens de réduire la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur les protocoles de routage hiérarchiques adapté pour les réseaux de capteur sans fil. Nous présentons d'abord brièvement quelques notions sur la clustérisation puis nous détaillons sur les protocoles de routage hiérarchique.

3.2 Quelques définitions sur la clustérisation

Le clustering dans les réseaux de capteurs sans fil est le processus de division du réseau en groupes de nœuds, dont chaque groupe est géré par un chef appelé clusterhead. Ce dernier est chargé de la collection des données captées par tous les membres du groupe, il les agrège et les envoie vers la station de base.

L'utilisation du mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs peut contribuer d'une façon considérable à l'économie d'énergie, la réduction de la complexité des protocoles de routage ainsi qu'à une meilleure résistance au facteur d'échelle (scalability). En effet, le routage hiérarchique facilite l'agrégation de données, ce qui conduit à diminuer les redondances et les transmissions inutiles vers la station de base.

D'autre part, le clustering permet aux nœuds d'effectuer des transmissions sur des courtes distances avec leurs cluster-head, ce qui minimise la consommation d'énergie et optimise l'utilisation des ressources du medium de communication [49]. Nous présentons ci-dessous les principaux composants d'une architecture hiérarchique pour un réseau de capteurs :

-Nœud capteur

Le nœuds capteur est le composant noyau du réseau. De plus, ces capteurs peuvent jouer des rôles multiples, tel que la sensation simple, stockage, conduite de données et traitement. Cela dépend des leurs capacités en termes de calculs et puissance énergétique sans oublier l'influence du mécanisme d'affectation des rôles adapté par le protocole de clustering[50].

- Cluster

Le cluster est un ensemble de nœuds capteurs qui forme l'unité d'organisation d'un réseau de capteurs. La nature dense de ses réseaux exige de les décomposer en cellules ou clusters afin de simplifier les tâches de communication et de répondre aux différentes contraintes.

- Cluster-heads (CHs, leaders, chefs de groupes)

Se sont les représentants des clusters. Ils sont souvent nécessaires pour l'organisation des activités dans les clusters. Leur tâche ne se limite pas à l'agrégation de données, elle s'étend aussi à l'organisation de la communication intra-cluster et mêmes inter-clusters. Ces chefs peuvent être élus par les autres nœuds ou bien sont pré-assignés par le concepteur du réseau. ils peuvent aussi être juste des nœuds ordinaires, ou bien des nœuds dotés de plus d'énergie [50].

- Station de base

La station de base se situe à un niveau supérieur de la hiérarchie d'un réseau de capteurs, elle permet de fournir une liaison entre le réseau l'utilisateur final[50].

- L'utilisateur

Les données générées par un réseau de capteurs sont employées dans une large gamme d'applications [51]. Ces dernières sont accessibles via Internet, à l'aide d'un PDA ou d'un ordinateur de bureau. Une simple requête générée par l'utilisateur final est diffusée dans le réseau permet de recueillir toutes les données souhaitées.

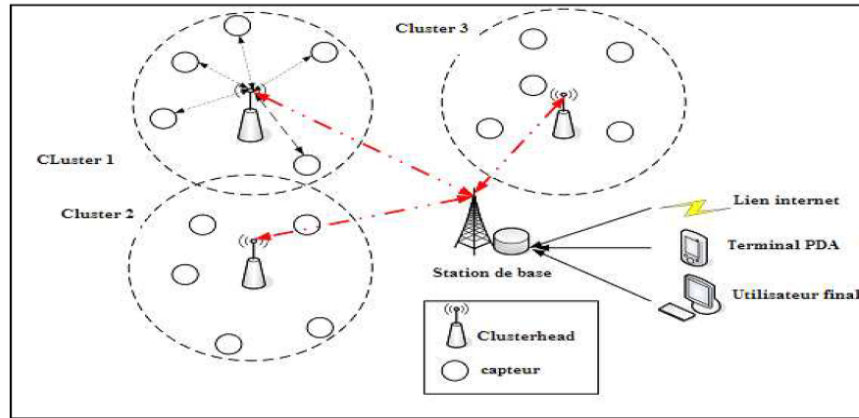


FIGURE 3.1 – Hiérarchie d'un réseau de capteurs sans fil [52].

3.3 Avantages du routage hiérarchique

- Agrégation des données transmise par les nœuds d'un cluster, et l'envoyer ces données vers le puits .
- Accès au canal basé sur la réservation (TDMA, CDMA, etc.)
- Optimiser l'utilisation de la bande passante en limitant les interactions inter-cluster et évitant les échanges superflus des messages avec station de base .
- Réduire la taille des tables de routage stockées au niveau des nœuds en localisant le chemin, car la mise en place des routes se fait seulement au niveau des cluster-heads.
- Implémenter des mécanismes par les CHs afin d'augmenter la durée de vie de la batterie, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.

3.4 Les contraintes de conception d'un protocole de routage hiérarchique

Il existe plusieurs contraintes qui doivent être considérées lors de la conception des protocoles de routage hiérarchique. Ces contraintes ont une grande influence sur la structuration du réseau ainsi que ses performances. Nous citons parmi elles quelques une :

3.4.1 Energie limitée

Les nœuds capteurs ont un stockage d'énergies limitées et l'utilisation efficace de cette dernière est un défi à relever. Cette contrainte énergétique doit être prise en compte dans le processus de clustering afin de réduire la dissipation d'énergie entre les nœuds du réseau. Par ailleurs, ce défi énergétique a un impact direct sur la durée de vie du réseau en entier. Pour cela, grouper les nœuds

dans les clusters devrait organiser la topologie du réseau et contribuer à réduire la consommation d'énergie de ses nœuds afin d'augmenter sa durée de vie [53].

3.4.2 Formation de clusters

L'efficacité d'un algorithme de clustering est évaluée en termes de nombre de clusters formés et de leurs stabilités en fonction de la mobilité des nœuds (la capacité de s'adopter au changement de la topologie du réseau). Il existe plusieurs méthodes de formation de clusters. Mais la plus répondue s'exécute sur trois [50].

► Election de cluster-head

Appelée aussi la phase Set-up : chaque nœud prend la décision de devenir CH ou bien de se joindre à un CH selon sa connaissance locale de la topologie en utilisant une métrique spécifique ou une combinaison de métriques tels que le plus grand/petit ID dans son voisinage, le degré de connectivité, la puissance de transmission et l'énergie résiduelle, ou bien selon un poids qui représente une combinaison de quelques métriques [50].

► Communication intra-cluster et inter-cluster

Chaque cluster-head se charge des communications à l'intérieur de son cluster et maintient les informations de routage lui permettant de joindre la station de base. Pour atteindre la station de base, les clusters-heads communiquent directement à cette dernière sinon une communication multi-saut est adoptée en utilisant d'autres clusters-heads comme nœuds relais [54].

► Maintenance des clusters

Dans le but de s'adapter aux changements de la topologie du réseau, une mise à jour des clusters est dynamiquement réalisée pour reconnaître les nouveaux nœuds ajouter ou ceux disparus (les nœuds qui ont consommés leurs énergies). D'autre part, si le cluster-head garde son statut le plus longtemps possible, même s'il ne possède pas par exemple le poids maximum dans son propre cluster alors il perdra son rôle une fois sa batterie sera épuisée [54].

3.4.3 Synchronisation

L'une des principales limites des réseaux de capteurs sans fil est la limite d'énergie des nœuds, la transmission par tranche de temps en utilisant (TDMA) permet aux nœuds de programmer régulièrement des intervalles de sommeil afin de réduire au minimum la consommation d'énergie, de tels procédés exigent des mécanismes de synchronisation pour installer et maintenir le plan de transmission, ce qui aura des effets considérables sur la vie et l'ensemble des performances du réseau [54].

3.4.4 Agrégation de données

densité des nœuds. Cependant, il y a souvent de multiples capteurs qui recueillent la même information dans le réseau. L'agrégation sert à combiner les données qui proviennent de plusieurs nœuds en une information significative ce qui éliminera la redondance. Entre autre, l'utilisation des techniques d'agrégation de données dans les protocoles de clustering réduit la quantité des données transmises, minimise considérablement la communication entre les nœuds, résous le problème d'implosion dans les tables de routage et allège en conséquence la congestion du réseau [50].

3.5 Quelques exemples sur les protocoles de routage Hiérarchique

3.5.1 LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est un protocole de routage hiérarchique introduit par Hienzelman et all. Ce protocole se base sur la clustérisassions dynamique.

Au départ, LEACH sélectionne au hasard quelques nœuds capteurs au tant que chefs de cluster et tourne ce rôle d'une manière uniforme pour répartir la charge entre les capteurs et prolonger la durée de vie du réseau. Dans [28], le pourcentage des nœuds capteurs qui doivent agir au tant que chefs de groupe est égale a 5%, ces clusters agrègent les données transmises par ses membres et envoient ces données à la station de base, Pour cette raison, les clusters head ont besoin plus d'énergie que les autres nœuds. L'opération de Leach est divisée en tours, où chaque tour commence avec une phase d'installation suivies d'une phase de communication :

La phase d'installation :

Chaque capteur choisit lui-même d'être un chef de groupe avec une probabilité P qui est choisie en fonction du nombre de Clusters k et du nombre de nœud capteurs N dans le réseau.

De même pour les prochaines chois des itérations suivantes, ce protocole vérifie si le nœud n'été pas une tête de groupe dans les plus récents tours. Puis chaque capteur choisit un nombre aléatoire, r , entre 0 et 1. Si ce nombre aléatoire est inférieur à une valeur de seuil $T(n)$, le nœud devient un CH pour le cycle actuel. Le seuil est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } (n \in G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où P est le pourcentage désiré des CHs, r est l'itération actuelle et G représente l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été cluster-heads dans les dernières $(1/P)$ itérations.

Une fois que les CHs sont choisies, ils envoient un message d'annonce au reste des nœuds dans le

réseau qu'ils sont les nouveaux chefs de cluster.

Après avoir reçu cette annonce(ADV) contenant l'ID du nœud et un en-tête qui distingue ce message d'annonce. Chaque nœuds non tête décident du groupe auquel ils veulent appartenir. Cette décision est basé sur l'intensité du signal d'annonce, puis il informe le CH qu'il appartient à son groupe, et cela ce fait par un message Join-REQ contenant l'ID du nœud et l'ID du CH.

A la réception de tous les messages à partir des nœuds qui serait certainement inclus dans le cluster, le CH crée une planification TDMA afin d'attribuer pour chaque nœud une tranche de temps où il peut transmettre. Ce calendrier sera diffusé à tous les nœuds du cluster.

La phase de communication :

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

Discussion

Leach distribue la consommation d'énergie entre les nœuds du réseau par la clustérisations dynamique, mais étant donné qu'il est l'un des protocoles les plus anciens, il n'a pas pris en considération certaines failles. Parmi ces failles, la négligence des positions des clusters Head par rapport à la station de base, sachant que ces clusters utilisent la transmission directe, ce qui consomme plus d'énergie. Pour remédier a ça, nous allons utiliser une transmission multi-saut en appliquant l'algorithme de Dijkstra. Cet algorithme nous permet de choisir un meilleur chemin avec un coût minimal.

3.5.2 LEACH-R

Ce protocole [31] garde le même fonctionnement que LEACH, cependant la première phase a été modifié par l'ajout de la probabilité du seuil amélioré pour la sélection du CH, le seuil est décrit comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*(r \bmod \frac{1}{P})} * (\delta P + (1 - P) * \frac{E_{curent}}{E_{initial}}), & \text{si } n \in G \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

Sachant que :

- $E_{residual}$: est l'énergie résiduelle du nœud, E_0 :l'énergie initiale du nœud, - δ : Nombre consécutive de rounds dans lequel le nœud n'a pas encore été élu CH.

Ce seuil assure que seuls les nœuds avec une grande énergie résiduelle ont la chance d'être élu comme CH, ce qui assure l'équilibrage énergétique du réseau .Les CHs ainsi élu diffusent aux nœuds les informations concernant leurs distances par rapport à la station de base et leurs énergies résiduelles, ainsi les nœuds choisissent leur CH à joindre, ce processus est similaire à celui de LEACH. Apres la sélection des CHs en passe à la sélection du nœud R entre les CHs, qui se base

sur le paramètre λ qui se calcul à partir des informations de l'énergie résiduelle et de la distance par rapport à la station de base des CHs, qui est calculé comme suit :

$$\lambda = \frac{E_{\text{residual}}}{d_{\text{toSB}}} \quad (3.3)$$

Ensuite le CH qui a le plus grand λ sera élu comme le nœud R, durant la phase de steady state tous les clusters head enverront leurs données au nœud R qui va les agréger et les transmettre à son tour vers la station de base.

Discussion

LEACH-R utilise la transmission multi-saut pour les données envoyés vers la station de base, cette transmission est réalisé par un seul capteur appelé nœud-R. ce nœud agrège d'abord les données avant de les envoyés vers la station de base. Par conséquent, cette méthode influe sur la connectivité du réseau, de tel sorte que le nœud-R sera surchargé ce qui rend son épuisement plus rapide.

3.5.3 EL-LEACH (Energy and Load balance LEACH)

Dans EL-LEACH, tous les nœuds doivent êtres des nœuds tête pour chaque tour, cela peut mener à un cas où un nœud doit être un CH et perdra son énergie au plus vite possible ce qui diminue la durée de vie du réseau, et un autre défit pour Leach c'est qu'un cluster Head peut avoir de nombreuse nœud voisin qu'un autre et ce nœud sera surchargé.

EL-Leach [55] se base sur des tours et chaque tour suit les trois étapes suivantes :

- Pour la première étape, EL-Leach apporte des changements sur la fonction de $T(n)$ de telle sorte que :

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(\text{rmod}\frac{1}{P})} * \frac{E_{\text{res}}(i)}{E_{\text{init}}} & \text{si } i \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Cette probabilité donne la chance au nœud qui ont plus d'énergie pour devenir des nœuds tête.

- Dans la deuxième étape, après qu'un nœud génère un nombre aléatoire R de 0 à 1, compare ce nombre à $T(n)$. Si $R \geq T(n)$, le nœud installe son statut à PLAIN. Si $R < T(n)$, nœud installe son statut au CANDIDAT.

Le nœud CANDIDAT envoient alors un message de HEAD-COMPETE (comportant son ID, son énergie et sa distance vers la SB) à d'autre nœuds CANDIDAT. Après la réception de tous les messages HEAD-COMPETE, le CANDIDAT calcule la fonction suivante :

$$F_{(\text{HEAD-COMPTE})} = \frac{E_{\text{res}}}{d} \quad (3.5)$$

Si sa valeur F est la plus grande valeur parmi tous ses voisins, il devient CH et change son statut du CANDIDAT en TETE, et annonce le message HEAD-ADV.

La fonction 2 assure qu'un seul nœud sera tête dans son rayon et que ce nœud a la plus grande valeur en termes d'énergie et le plus proche à la SB.

- Dans la troisième étape, Chaque nœud PLAT, après la réception de toute messages HEAD-ADV des CHs qui sont autour de lui, calcule la fonction suivante :

$$F_{(\text{HEAD-COMPTÉ})} = \frac{d(i, j) \times d(j)}{E_{\text{res}}(j)} \quad (3.6)$$

Où $d(i, j)$ est la distance d'un nœud PLAIN i à un ch j , $d(j)$ est la distance d'un ch à la SB et $E_{\text{res}}(j)$ est l'énergie du CH j .

Le nœud PLAIN choisi alors le CH ayant la valeur minimal de F-HEAD-JOINT et envoie un message JOIN-CLUSTER à ce CH afin de devenir l'un de ses membre.

Après la réception de tout le message JOIN-CLUSTER, le CH calcule et crée une TDMA de différentes tranches de temps, puis il informe chaque nœud de son groupe du temps réservée pour transmettre ses données. Lorsqu'un CH reçoit des données de ses membres, ce nœud agrège ces données et les envoie vers la SB.

Discussion

Dans EL-LEACH prend en considération la contrainte d'énergie lors de la sélection des clustars Head, ce qui réduit la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau. Par conséquent, ce protocole choisi un seul nœud parmi les clusters head sélectionnés au départ et élimine le reste.

3.5.4 Les protocoles TEEN et APTEEN

Deux protocoles de routage hiérarchiques appelés Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN) et Adaptive Periodic TEEN (APTEEN) ont été proposé dans [36] . Ces protocoles ont été proposés pour les applications critiques en termes de temps. Dans TEEN, les nœuds capteur écoutent le médium continuellement, mais la transmission de données n'est pas faite fréquemment. Un nœud CH (cluster Head) envoie à ses membres un seuil hard (hard threshold), qui est la valeur seuil de l'attribut mesuré, et un seuil Soft (soft threshold), représentant une petite variation de la valeur de cet attribut. L'occurrence de cette petite variation permet au nœud qui la détecte de la signaler à la station de base en transmettant un message d'alerte. Par conséquent, le seuil Soft réduira le nombre de transmissions puisqu'il ne permet pas la transmission s'il y a peu ou pas de variation de la valeur de l'attribut mesuré. Lorsque la valeur de l'attribut détecté dépasse le seuil Hard, le nœud transmet l'information. La valeur de l'attribut détecté est stockée dans une variable interne. Puis, les nœuds ne transmettront des données que si la valeur courante de l'attribut est supérieure au seuil hard ou diffère la variable stockée d'une quantité égale ou plus grande que la valeur du seuil Soft.

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 cluster-heads diffuse les paramètres suivants :

- **Attributs (A)** : un ensemble de paramètres physiques auxquels l'utilisateur est intéressés à obtenir de l'information .
- 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)** : la période de temps maximum entre deux transmissions successives d'un nœud. Les nœuds surveillent continuellement 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 cluster head 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. Un calendrier TDMA est utilisé, et chaque nœud du cluster est associé un intervalle de transmission.

Discussion

Puisque la transmission d'un message consomme plus d'énergie que la détection des données, alors la consommation d'énergie dans TEEN est moins importante que dans les protocoles proactifs. Cependant, l'inconvénient principal de ce protocole est que, si les seuils ne sont pas reçus, les nœuds ne communiqueront jamais, et aucune donnée ne sera transmise à l'utilisateur.

Par ailleurs, le protocole TEEN a une extension appelé APTEEN, ce dernier offre une grande flexibilité qui permet à l'utilisateur de choisir l'intervalle CT. Cependant, ce protocole nécessite une complexité supplémentaire pour implémenter les fonctions de seuils et de périodes de temps CT.

3.5.5 SMECN(Small Minimum Energy Communication Network)

Dans [65], Li propose un petit réseau de transmission d'énergie minimal (SMECN). Le sous-réseau (c.-à-d., sous-graphe G') construit par SMECN est plus petit que celui construit par MECN si la région de diffusion est circulaire autour du nœud diffuseur, pour une puissance donnée. Le sous-graphe G' du graph G , qui représente le réseau de capteurs, réduit au minimum l'utilisation d'énergie satisfaisant les conditions suivantes :

- Le nombre d'arêtes de G' est inférieur à G tout en contenant tous les nœuds dans G . - L'énergie requise pour transmettre des données depuis un nœud à tous ses voisins dans le sous-graphe G' est inférieure à celle requise dans le graphique G . On suppose que $r = (u, u - 1, \dots, v)$ est un chemin entre u et v qui traverse $k - 1$ nœuds intermédiaires ($u - 1, \dots, u - (k - 1)$). La consommation

d'énergie totale d'un chemin comme r est donnée par

$$C(r) = \sum_{i=1}^{(k-1)} (p(u_i, u_{i+1}) + c) \quad (3.7)$$

Où $p(u_i, u_{i+1})$ est l'énergie de transmission nécessaire entre le nœud u_i et le nœud u_{i+1} , et c l'énergie de réception de données.

Et l'énergie nécessaire pour transmettre les données entre un nœud u et un autre v sous ce protocole est donnée par la formule suivante :

$$p(u, v) = (t * d(u, v)^n) \quad (3.8)$$

Où t est une constante du temps, n est un facteur d'atténuation de signal lié aux transmissions radios, généralement $n \geq 2$, et $d(u, v)$ est la distance entre les nœuds u et v .

Discussion

SMECN est une amélioration du protocole MECN, ce protocole construit un sous réseau de communication, qui contient un graphe minimal (en terme de nombre d'arcs) avec des chemins efficaces en énergie, mais cela rend l'approche plus complexe de point de vue algorithmique.

3.5.6 EECS(Energy Efficient Clustering Scheme in WSN)

Dans EECS [56], 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 clustre Head, 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 clustre Head 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.

Discussion

EECS présente de meilleures performances, en termes de conservation d'énergie et prolongation de la durée de vie du réseau. Par conséquent, ce protocole utilise un seul saut lors de la transmission ce qui implique une consommation importante d'énergie par les noeuds distant de la station de base.

3.5.7 SOP(Self Organizing Protocol)

Subramanian et Katz [57] ont introduit une taxonomie des différentes applications des réseaux de capteurs. Basé sur cette taxonomie, ils ont proposé les composants architecturaux nécessaires pour la réalisation de telles applications. L'architecture générique développée supporte des capteurs hétérogènes, stationnaires ou mobiles. Certains de ces capteurs surveillent l'environnement et renvoient les données vers un ensemble spécifique de nœuds qui agissent comme routeurs.

Les données collectées sont renvoyées via les routeurs aux nœuds puits considérés plus puissants, et chaque capteur doit être accessible par un routeur pour faire partie du réseau. L'approche de routage proposée exige un adressage des nœuds routeurs. Les capteurs sont cependant identifiables via l'adresse du routeur auquel ils sont connectés. L'architecture du protocole SOP est également hiérarchique où des groupes de capteurs sont construits et fusionnés en cas de nécessité.

Afin de prendre en charge la tolérance aux pannes, l'algorithme des boucles markoviennes locales (LML) qui effectue des parcours aléatoires sur l'arbre couvrant (spanning tree) d'un graphe donné est utilisé pour les opérations de diffusion.

L'algorithme élabore un réseau auto-organisé pour créer les tables de routage, cette démarche se décompose en quatre phases :

1. Phase de découverte

les nœuds voisins de chaque capteur sont identifiés.

2. Phase d'organisation

des groupes de capteurs sont constitués et fusionnés en formant une hiérarchie. Chaque nœud se voit assigner une adresse basée sur sa position dans la hiérarchie.

3. Phase de maintenance

la mise à jour des tables de routage et des niveaux d'énergie de chaque nœud est effectuée périodiquement. Chaque nœud informe les voisins au sujet de sa table de routage et de son niveau énergétique. LML est employé à la maintenance de l'arbre d'émission.

4. Phase d'auto-réorganisation

en cas d'échec d'un nœud, une réorganisation de groupe doit être faite. La tolérance aux fautes est également réalisée en employant LML dans l'arbre d'émission.

Discussion

Ce protocole a comme avantage majeur la garantie de la réduction des coûts liés à la maintenance des tables de routage, en plus de l'architecture hiérarchique équilibrée. Par conséquent, la phase d'organisation n'est pas réactive ce qui nécessite un overhead supplémentaire. De même, la phase de réorganisation lors de l'échec d'un nœuds introduit des coûts de communications considérables.

3.5.8 Le protocole LEACH-C

Leach-c [45] est une amélioration de Leach, il se diffère sur quelque point mais il utilise le même principe. Ce protocole utilise un algorithme de classification centralisée.

Tout nœud du réseau transmet à la station de base des informations sur sa localisation, ainsi sur son niveau d'énergie. Dès lors, la station de base va utiliser ces informations globales sur le réseau pour produire une meilleure structuration en clusters, en calculant le nombre optimal de ces clusters par un protocole d'optimisation, tout en se basant sur la moyenne des niveaux d'énergie. Et donc, elle va affecter pendant chaque itération, des rôles pour les différents nœuds (CH ou capteur simple). Les nœuds ayant un niveau d'énergie supérieur à la moyenne sont élus comme CHs. Dès que le nombre optimal de clusters est déterminé, la station de base annonce les identités de CHs par une diffusion de messages dans le réseau. Pour continuer le fonctionnement de ce protocole de la même manière que LEACH.

Discussion

Cette approche permet une diminution remarquable de la consommation énergétique, mais en revanche elle n'est pas adaptée aux réseaux de grande dimension, due à l'overhead engendrée dans le réseau suite au grand nombre de messages échangés.

3.5.9 LCH (Layered Clustering Hierarchy protocol) :

Y. Wang et B. Ramamurthy [58] proposent, en 2007, un protocole de Clustering basé sur une hiérarchisation en forme de couches dites LCH qui fixe comme objectif la conservation de l'énergie et la scalability du réseau WSN.

Dans le protocole LCH les nœuds sont organisés en couches selon leurs distances, en nombre de sauts, par rapport à la station de base, chaque couche exécute un algorithme distribué LEACH-like ou un nombre défini de Cluster Heads est choisi. Ensuite, les nœuds non CH choisissent leurs clusters en se basant sur le coût de la communication. Les nœuds CH reçoivent les données envoyées par les membres de leurs clusters, les agrègent et les envoient vers la couche supérieure. Une rotation des CH est effectuée pour équilibrer la consommation de l'énergie et garantir une durée de vie plus longue du réseau. Les nœuds CHs sont choisis en se basant sur le calcul d'une probabilité p de la forme

$$T_j(\mathbf{n}) = \begin{cases} \frac{k_i}{N_t - k_i * (\text{rmod} \frac{N_t}{k_i})} & \text{si } (C_j(t) = 1) \\ 0 & \text{si } (C_j(t) = 0) \end{cases} \quad (3.9)$$

Où : K_i est le nombre de CH dans la couche i ; N_i est le nombre totale des sur la couche i ; r est le nombre de rounds passés ; $C_j(t) = 0$ si le nœud j a été désigné comme CH dans les rounds les plus récentes. Une fois le CH est choisi, il annonce son état en diffusant un message avec le maximum

de la puissance de transmission pour attirer des nœuds membres. Ensuite, il attend les messages d'adhésion émanant des autres nœuds. Par la suite, chaque nœud non CH choisi aléatoirement son cluster, parmi les 3 meilleurs CHs qui nécessitent le minimum d'énergie de communication. Si un nœud reçoit des annonces émanant des CHs d'autres couches, il rejoint ceux qui appartiennent à la même couche que lui. Les nœuds CHs recevant des annonces des couches supérieures mettent à jour leurs informations afin de parvenir à les rejoindre. Après que les messages d'adhésion des nœuds soient reçus, chaque CH crée et diffuse une planification TDMA pour les membres de son cluster.

Discussion

Le protocole LCH permet des performances meilleures que LEACH en éliminant la contrainte de la possibilité de communication directe entre le puits et l'ensemble des nœuds du réseau, en adoptant une communication en multi-sauts. En plus, La réélection aléatoire du CH permet une meilleure distribution de la consommation de l'énergie. Il est à noter que l'organisation en couches permet de réduire le délai de livraison de données vers la SB car les données sont envoyées d'une couche inférieure vers une couche supérieure, en se rapprochant du puits.

Cependant, le protocole LCH ne garantit pas une distribution homogène des CHs sur le réseau car il se base sur l'algorithme LEACH. Il n'accorde aucune considération à l'énergie des capteurs lors du choix des nœuds CHs ou bien lors de leurs réélections.

3.5.10 MCR (Multi-hop Clustering Routing Protocol)

Q.Yang et autre [59] proposent, en 2011, un protocole de Clustering, (baptisé) appelé Multi-hop Clustering Routing Protocol(MCR), basé sur l'utilisation des nœuds Gateway pour parvenir (arriver) à une livraison de données vers station de base éloignée avec un coût raisonnable en énergie.

Le protocole MCR utilise un principe de transmission inter-cluster à deux sauts .pour que les nœuds CHs peuvent communiquer avec la station de base, il faut utiliser d'abord un nœud intermédiaire (Gateway) qui se trouve dans une zone couverte par le puits. Pour les autres nœuds, le protocole propose d'utiliser le même principe que le protocole HEED pour l'installation des clusters.

Initialement, le puits envoie un message SinkMsg vers la zone de captage, les nœuds qui reçoivent ce message répondent par un message ChilReq qui indique leurs candidatures pour devenir nœud Gateway. En suite, la station de base choisit les Gateway en répondant par un message d'acceptation.les autres nœuds exécutent l'algorithme de Clustering relatif à HEED. Une fois les nœuds CHs définis, chacun d'eux choisit son nœud Gateway en se basant sur le coût de la communication. Afin de s'assurer une meilleure utilisation des nœuds Gateway.

Une fois la topologie construite, les nœuds simples envoient leurs données vers leurs CH, qui les agrège et les envoie vers son nœuds Gateway afin d'atteindre le puits. Pour la rotation des nœuds CH

se fait sur la base de l'énergie résiduelle du CH alors que HEED utilise une réélection périodique sans aucune vérification de condition. Les résultats globale du réseau est envisagée à chaque fois que quatre nœuds du réseau sont hors utilisation.

Discussion

Le protocole MCR prolonge la durée de vie des nœuds CHs, et par conséqaunce celle du réseau, en adoptant une communication intre-cluster en deux sauts et une réélection basée sur l'énergie résiduelle.d'autre part, les nœuds Sont déchargés de la phase Clustering ce qui limite leurs responsabilités à acheminer les paquets vers le puits. Cela minimise considérablement leurs dépenses énergétiques.Néanmons, le protocole MCR se focalise uniquement sur la communication inter-cluster et ignore celle de l'intra-cluster qui est responsable de la surconsommation en énergie. Le nombre important des clusters générés vu l'utilisation des communications intra-cluster à un saut.

3.6 Un tableau comparatif pour les protocoles de routage hiérarchique

Protocoles	Classification	mobilité	Puissance de transmission	Agrégation des données	Basé sur les requêtes	Objectif
LEACH	Hiérarchique	Station de base fixe	Fixe	Oui	Non	Formation des clusters pour prolonger la durée de vie
TEEN et APTEEN	Hiérarchique	Station de base fixe	Fixe	Oui	Non	Temps réel et durée de vie
SOP	Hiérarchique	possible	Fixe	Oui	Non	Tolérance aux fautes
MECN et SMECN	Hiérarchique	Non	Réglable	Non	Non	Augmente la durée de vie du réseau et garentie l'auto-reconfiguration
EECS	Hiérarchique	Station de base fixe	Réglable	Non	Non	Prolonge la durée de vie du réseau
LCH	Hiérarchique	Station de base fixe	Fixe	Non	Non	Garantir la durée de vie du réseau
MCR	Hiérarchique	Station de base fixe	Fixe	Oui	Non	Forme des nœuds Gateway pour prolonger la durée de vie des CHs
LEACH-R	Hiérarchique	Station de base fixe	Fixe	Oui	Non	Forme des nœuds R comme relais entre les CH et SB

TABLE 3.1 – Classification des protocoles de routage présentés selon les paramètres de décision et les attributs de clustering.

3.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire une étude critique pour certain protocole de routage hiérarchique et une comparaison entre ces différents protocoles. Bien que certaines approches paraissent aimables, il existe toujours certains failles qui nécessitent leur prise en considération par les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce qui suit, nous allons nous inspirer sur ces protocoles pour proposer un nouveau protocole de routage hiérarchique à basse de consommation énergétique.

CHAPITRE 4

LEACH-G (LOW ENERGY ADAPTIVE CLUSTERING HIERARCHY-GRAPH)

4.1 Introduction

Après des années de recherche, la contrainte d'énergie reste un défi majeur dans les réseaux de capteurs sans fil, ce qui est due à la capacité limitée des capteurs et de leur batterie qui est difficile à recharger et même parfois impossible. Pour y remédier à cette contrainte, plusieurs approches sur le routage hiérarchique ont été proposées, cela consiste à repartitionner le réseau en groupes, où chaque groupe est géré par un chef de groupe (clusterhead). Ce dernier transmet les données collectées par l'ensemble des nœuds à la station de base en un seul saut.

Sachant que la transmission directe (un seul saut) vers la station de base épuise beaucoup plus d'énergie qu'une transmission multi-saut qui nous donne un gain considérable en énergie ainsi prolonger la durée de vie du réseau et c'est sur ce contexte que se base notre approche.

Dans ce chapitre nous proposons un nouveau protocole de routage hiérarchique à basse consommation énergétique qui vise à améliorer le protocole de routage LEACH en lui introduisant L'algorithme de Dijkstra qui calcule le meilleur chemin ayant un poids minimal, entre la source et la destination.

4.2 Motivation

L'acheminement de données a une grande influence sur la dissipation d'énergie dans les différentes approches du réseau. En effet, certain de ces approches adapte une communication a un seul saut, ce qui augmente plus la consommation d'énergie et affaiblit les performances du réseau. Parmi ces approches, le protocole LEACH.

Ce protocole distribue la charge entre les nœuds du réseau en utilisant la clustérisation dynamique,

par conséquent, il existe toujours certaines failles qu'il néglige, telle que la contrainte d'énergie lors de la sélection des clusters head et le routage a un saut lors de l'envoi de données vers la station de base, ce qui augmente le nombre de collision et réduit la qualité de réception de ces données. Pour remédier à ces failles, nous ajoutons la contrainte d'énergie, afin de garantir la sélection des nœuds ayant suffisamment d'énergie comme clustershead, et appliquer l'un des algorithmes de la théorie des graphes. Sachant que cette dernière utilise des techniques et des outils mathématiques pour déduire des méthodes de résolution efficaces. Ce qui nous a encouragé à employer l'algorithme de djikstra afin de l'adapter au routage multi-sauts et d'assurer un meilleur chemin.

4.3 La notion de la théorie des graphes

La théorie des graphes est développée dans diverses disciplines telles que la chimie, la biologie et les sciences sociales. Depuis le début du 20ème siècle, elle constitue une branche à part entière des mathématiques [60].

De manière générale, un graphe permet de représenter la structure et les connexions d'un ensemble complexe en exprimant les relations entre ses éléments : réseau de communication, réseaux routiers, circuits électriques, etc. Ce qui facilite la modélisation des différents problèmes en se ramenant à l'étude de sommets et d'arcs. Sachant que les nœuds capteurs dans les RCSFs sont dotés d'une petite batterie, qui est par fois non rechargeable, la plus part des recherches dans ce domaine se concentre sur l'optimisation d'énergie.

De ce fait, nous avons utilisé l'un des algorithmes de la théorie des graphes qui est l'algorithme de djikstra.

Cet algorithme permet de déterminer les routes à emprunter avec un chemin de plus faible poids.

1. Description de l'algorithme de djikstra

L'algorithme de Dijkstra [61] est un algorithme de type glouton, il maintient deux ensembles :

- ◇ C, qui représente l'ensemble des sommets non visités ; au départ $C=S$ -source
- ◇ D, qui contient l'ensemble des sommets connaissant déjà leur plus petite distance à la source ; au départ, $D = \text{source}$.

Cet algorithme se termine lorsque C est vide.

Pour chaque sommet s dans D, il conserve dans un tableau (distances) le poids du plus court chemin jusqu'à la source, et dans un autre tableau (parcours) le sommet p qui le précède dans un plus court chemin de la source à s. les différentes étapes se résume comme suit :

• Première étape

Au début de l'algorithme, le chemin le plus court connu entre la source et chacun des sommets est le chemin direct, avec une arête de poids infini s'il n'y a pas de liaison entre les deux sommets. Il initialise donc le premier tableau par les poids des arêtes reliant la source à chacun des sommets, et le deuxième tableau par la source pour tous les sommets.

- **ième étape**

Durant cette étape, il est supposé avoir déjà traité le i sommets. Le tableau1 et le tableau2 contiennent respectivement les poids et le prédécesseur des plus courts chemins pour chacun des sommets déjà traités.

Soit s le sommet de C réalisant le minimum de distances[s]. il supprime s de C et l'ajoute à D . de même il met à jour les deux tableaux (distances et parcours) pour les sommets t reliés directement à s par une arête comme suit : si $\text{distances}[s] + F(s,t) < \text{distances}[t]$, alors il remplace $\text{distances}[t]$ par $\text{distances}[s] + F(s,t)$ et $\text{parcours}[t]$ par s .

- **(n-2)ème étape**

Au départ, il y a $(n-1)$ sommets à visiter, mais comme on le verra ci-après, la dernière étape est inutile puisqu'elle n'apporte rien. Ainsi, dès la $(n-2)$ ème étape, distances et parcours contiennent toute l'information nécessaire pour trouver des plus courts chemins de la source à chacun des autres sommets (car $D=S$). Sachant que $\text{distances}[s]$ est le poids du plus court chemin de la source à s , et $\text{parcours}[t]$ représente le prédécesseur de s dans le chemin calculé.

2. L'algorithme de DIJKSTRA

- Déclaration

L :ensemble contenant les sommets marqués. Il est initialisé a : $S = s$.

$P(s)$: variable initialisé à 0 ;

$F=S$.

On marque la source S .

A :l'ensemble des arcs constituant le plus court chemin.

$P(x)$: variable initialisé à inf ;

$D(x, y)$:est l'énergie consommée en déplaçant du nœud capteur x au nœud capteur y . algorithme

Algorithm 1 Algorithme de DIJKST**Debut****for** (1)tous x de non(S) **do**

Examiner chaque arcs de type (F,x)

if $(P(F) + d(F,x)) < P(x)$ **then** $P(x) \leftarrow P(F) + d(F, x);$ **end if****end for** $S = S \cup x;$ $A = A \cup (F,x);$ **if** $(S = x)$ **then**

terminer;

A est le chemin recherché.

else $F = x;$ **end if**

Aller à (1).

end

4.4 Hypothèses

Notre approche repose sur les hypothèses suivantes :

- Initialement, tous les nœuds ont le même niveau énergétique.
- Les nœuds sont distribués sur la zone de déploiement aléatoirement.
- Chaque nœud peut atteindre la station de base.
- La station de base est vue comme une ressource non limitée ni épuisable.
- La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie.
- Chaque nœud possède un identifiant unique.
- Les capteurs sont fixes.
- chaque round contient 5% de clusters Head.

4.5 Principe et fonctionnement

Notre approche garde le même principe que celui de LEACH pour la phase d'organisation de groupes mise a part le calcul du seuil qui est basé sur le protocole EL-LEACH (pour ce protocole, la valeur du seuil est multipliée par l'énergie résiduel sur l'énergie initial tel quelle est définie dans EL-LEACH), quand à la deuxième phase, nous avons amélioré le protocole en formalisant la topologie du réseau sous forme d'un graphe ensuite nous appliquant l'algorithme de Dijkstra.

pour remédier au problème de la contrainte d'énergie pour les nœuds qui sont loin de la station de base, ce qui consomme beaucoup d'énergie et réduit leurs espérances de vie ainsi engendrer la perte de la connectivité du réseau ,en effet l'algorithme de Dijkstra permet le multi-saut ce qui élargie la durée de vie des capteurs lointain et augmente la durée de vie du réseau. Notre approche se déroule en trois phases et chaque phase est détaillée comme suit :

1. La phase d'installation : LEACH-G suit le même principe que EL-LEACH lors de la formation des clusters, mise à part l'élimination des clusters-Head les plus proches. Cette phase permet d'organiser les nœuds en clusters où chaque cluster est géré par un clusterhead.

Au départ, les nœuds capteurs mettent leurs statues à 'non-élus', puis ils génères un nombre aléatoire entre 0 et 1 afin de le comparer au seuil suivant :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \pmod{\frac{1}{p}}} * \frac{E_r}{E_i} & \text{si } i \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

Tel que :

p : le pourcentage désiré des CHs.

r : l'itération actuelle.

G : l'ensemble des nœuds qui ont été sélectionnés comme CH durant les dernières $(1/p)$ itérations.

E_r : l'énergie résiduel d'un nœud.

E_i : l'énergie initiale d'un nœud.

Sachant que ce seuil est multiplié par l'énergie résiduelle sur l'énergie initiale

$$\frac{E_r}{E_i} \quad (4.2)$$

Si le nombre choisi par le nœud capteur est inférieur au seuil, ce nœud met son statue à 'élus', puis il envoie un message de contrôle vers la station de base, cette dernière lui rend avec un message contenant le nombre des clusters Head élus jusqu'à présent. Une fois que le nœud capteur a récupéré ce nombre, il teste si le nombre des clusters Head sélectionné ne dépasse pas 5%. Si cette condition est verifié, il devient un cluster Head pour ce rend.

Après la sélection des clusters Head, ils informent leur voisin de leurs élection en diffusant un message d'annonce ADV1. Et à la réception de ces messages annonces, le reste des nœuds déterminent le cluster auquel ils veulent appartenir tout en calculant la fonction suivante :

$$F = \frac{d(i,j) * d(j)}{E_{res}(j)} \quad (4.3)$$

Tel que :

$d(i,j)$: La distance entre un nœud normale et un clusterhead.

$d(i)$: La distance entre un cluster Head et la station de base.

$E_{res}(j)$: L'énergie résiduelle d'un cluster Head.

Selon ce calcule, le nœud normale choisi la valeur du F la plus minimal afin de déterminer le cluster Head auquel il veut appartenir, puis il lui informe par un message JOIN-REQ1, ce message

contient l'identité du nœud et l'identité du CH correspondant.

Dans Cette phase, la multiplication du seuil par la contrainte d'énergie permet de choisir comme clustershead les nœuds ayons une énergie importante, et la clustérisation dynamique assure la distribution de la charge dans tous le réseau.

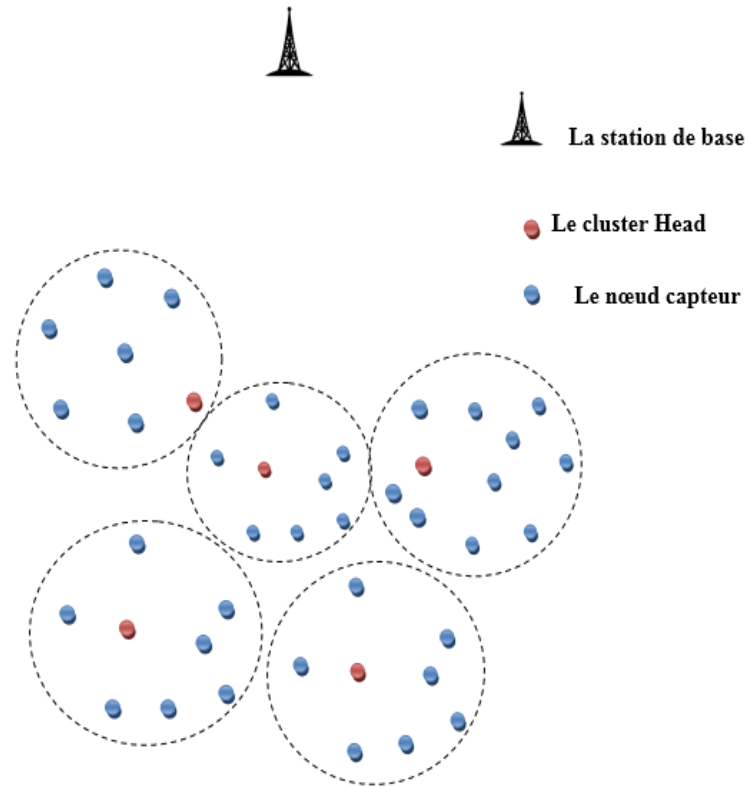


FIGURE 4.1 – Formation des clusters.

algorithme

Algorithm 2 Algorithme de l'élection des CHs

Début

$n = \text{aleatoire}()$ le nombre sera entre 0 et 1

if $n \leq T(n)$ **then**

 cluster [nbr-CH] = i;

$E[i] = E[i] - [(L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * d^2)]$;

 nbr - CH \leftarrow nbr - CH + 1;

end if

Envoyer (ADV1);

end

 La réception d'un ADV

a = 1

For i allons de 1 à nbr_noeud faire

If cluster [a] = i then

For j allons de 1 à nbr_CH

If (a ≠ j) alors

$E[i] = E[i] - (L * E_{elec})$; // l'énergie de réception

$dist-CH_CH[a][j] = \sqrt{(x_j - x_a)^2 + (y_j - y_a)^2}$;

endIf;

endFor ;

a ← a+1;

else

For j allons de 1 à nbr_CH faire

$E[j] = E[j] - (L * E_{elec})$;

$dist - CH_CH[a][j] = \sqrt{(x_j - x_a)^2 + (y_j - y_a)^2}$;

endFor

$F[i, j] = \frac{d(i, j) * d(j)}{E_{res}(j)}$

min = F[i,1];

For j = 2 à nbr_CH then

If F[i,j] < min then

min ← F[i,j];

m ← j;

endIf

endFor

$E[i] = E[i] - (L * E_{elec} + L * e_{fs} * min^2)$;

Envoyer R_Quest(m, min, i) ;

end .

2. La phase d'acheminement : Cette phase se base sur la découverte du prochain saut designé par la station de base de chaque clusterhead.

Pour ce faire, le CH diffuse un message d'annonce(ADV2) pour les CHs et ce dernier répond avec un R-Quest2 dans le but de déduire la distance entre ce nœud et les autres CHs. Puis il calcule son niveau énergétique et envoie ces informations à la station de base. Cette dernière calcule le poids de chaque arc reliant deux CHs, en utilisant la distance et l'énergie émise par ces clusters :

$$\text{Poids}(i, j) = \left\{ \frac{d(i, j)}{E_i + E_j} \right. \quad (4.4)$$

Tel que :

- E_i : l'énergie d'un nœud i ;
- E_j : l'énergie d'un nœud j ;
- $d(i, j)$: la distance entre un nœud i et un nœud j .

Une fois que la station de base a calculé tous les poids, elle applique l'algorithme de Dijkstra décrit au par avant. Cet algorithme permet de déterminer le prochain nœud ayant plus d'énergie pour envoyer la donnée jusqu'à arriver à la station de base.

Après le calcul du prochain saut de chaque CHs, la station de base informe tous les CHs de leur prochain saut.

A la réception de tous les messages des membres désirant être membre du cluster, et du prochain saut, le CH crée un TDMA, qui sera diffusé à tous ses membres afin de leur assigner un interval de temps pour transmettre leur données.

3. La phase de transmission : Après la formation des clusters et la découverte du prochain saut pour chaque CH, les nœuds peuvent commencer l'envoi de leurs données aux CHs selon leurs tranches du temps. Les CHs fusionnent et agrègent toutes données reçues et les envoient vers le prochain saut désigné par la station de base. A la fin de chaque round, le processus rentre dans un nouveau cycle en revenant à la première phase.

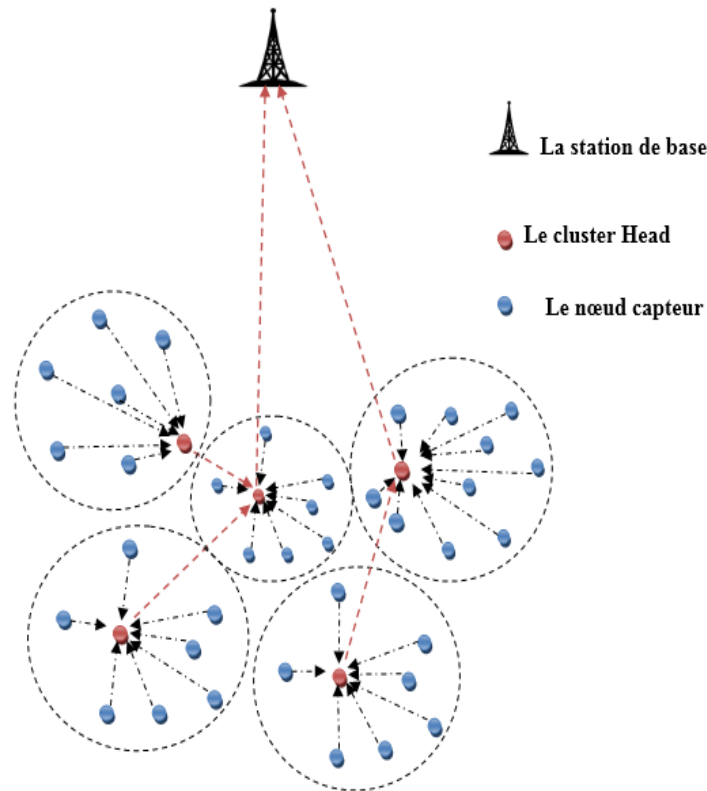


FIGURE 4.2 – Transmission de données.

4.6 La durée de vie du réseau

La principale contrainte dans le réseau de capteur sans fil est la consommation d'énergie. Cette dernière a une grande influence sur la durée de vie du réseau.

De fait que ce réseau a des nœuds capteurs avec des batteries limitées et non rechargeables, la plupart des approches repose sur ce point, afin de réduire la consommation d'énergie et augmenté la durée de vie du réseau.

D'après [63], Il existe de différentes définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs (fondées sur la fonctionnalité désirée). Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où le premier nœud meurt. Elle peut également être définie par le temps jusqu'au moment où une proportion de nœuds meurt. Si la proportion de nœuds morts dépasse un certain seuil, cela peut avoir comme

conséquence la non-couverture de sous-régions et/ou le partitionnement du réseau. Nous citons certain définitions possibles et proposées dans la littérature :

1. La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie ;
2. La durée jusqu'à ce que le premier clusterhead épuise toute son énergie ;
3. La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction de nœuds survivants dans le réseau ;
4. **Demi-vie du réseau** : la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner ;
5. La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie ;
6. **La durée jusqu'à ce que le réseau soit partitionné** : apparition de la première division du réseau en deux (ou plus). Cela peut correspondre aussi à la mort du premier nœud (si celui-ci tient une position centrale) ou plus tard si la topologie du réseau est plus robuste ;
7. La durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture ;
8. La durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements ;
9. La durée pendant laquelle le réseau satisfait continuellement les besoins de l'application.

4.7 Le modèle d'énergie

Dans notre proposition, nous allons utiliser le modèle radio proposé par Heinzelman et al[28]. Pour le calcul de la consommation d'énergie en émission et en réception.

• Pour l'émission d'un message

$$T(n) = \begin{cases} \{k * E_{elec} + kE_{fs}d^2, & \text{si } d < d_0 \\ k * E_{elec} + kE_{amp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

tel que

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (4.6)$$

et selon Heinzelman $d_0=87,70$

$$E_{Rx}(k, d) = k * E_{elec} \quad (4.7)$$

où :

E_{elec} : est l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique).

E_{amp} : est l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur).

k : est la taille en bits d'un paquet de données.

d : est la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.

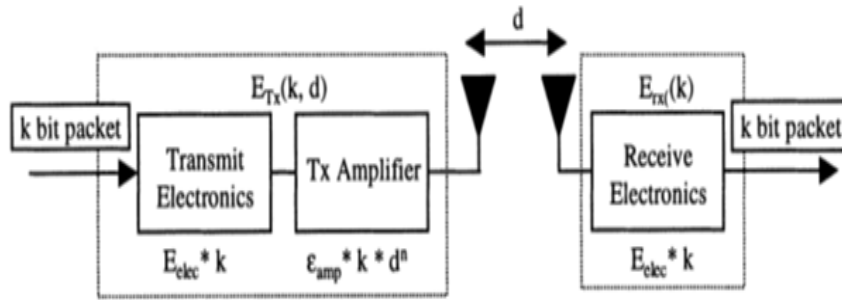


FIGURE 4.3 – Modèle d'énergie utilisé.

4.8 Simulation et analyse des performances de LEACH-G protocole

4.8.1 L'environnement de développement

Après avoir proposer une nouvelle approche, nous avons choisi le logiciel MATLAB afin d'analyser et de vérifier les performances de cette approche par rapport à son protocole original qui est LEACH, et aussi par rapport à l'un des plus récents descendants de ce dernier qui est LEACH-R.

4.8.2 Le choix de MATLAB

MATLAB est un logiciel de calcul numérique produit par MathWorks. Il est disponible sur plusieurs plateformes.

MATLAB est un langage simple est très efficace, optimisé pour le traitement des matrices, d'où son nom. Pour le calcul numérique, MATLAB est beaucoup plus concis que les vieux langages (C, Pascal, Fortran) et pour la programmation, il optimise le code des programmes en utilisant des fonctions pré définies. Nous pouvons traiter la matrice comme une simple variable.

MATLAB contient une interface graphique puissante, et on peut l'enrichir en ajoutant des "boîtes à outils" (toolbox) qui sont des ensembles de fonctions supplémentaires, profilées pour des applications particulières (traitement de signaux, analyses statistiques, optimisation, etc).

MATLAB contient également un langage de programmation de haut niveau dans lequel nous retrouvons la majorité des concepts des langages de programmation modernes (types Pascal et C). L'ordre d'exécution des instructions est déterminé par des structures de contrôle. Il permet aussi la création de fonctions et distingue les données locales des données globales. Ces avantages ont rendus de MATLAB, un langage de programmation et de simulation très sollicité [62].

4.8.3 Paramètre de simulation

Notre modèle de simulation est établi sur 100 à 1000 nœuds, sachant que les nœuds sont déployés aléatoirement et leurs position est fixe durant tout la période de simulation..

Paramètre	Valeur
la surface	100*100
Localisation de la station de base	(50,175)
Nombre de nœuds	100 à 1000
Energie initiale	0.5j
Taille de paquet de donnée	4000bit
Taille de paquet de contrôle	100bit

TABLE 4.1 – Les paramètres de simulation.

4.8.4 Métriques considérées

1. La consommation d'énergie

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la plus part des approches visent à minimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau, afin de remédier au problème de la recharge de batterie de ses nœuds capteurs a cause de leurs tailles et de leurs zone de déploiement. De ce fait, la contrainte d'énergie est le paramètre le plus étudié lors de la validation. Pour la comparaison des trois protocoles(LEACH, LEACH-R et LEACH-G), nous nous intéressons à la somme d'énergie restante dans le réseau.

2. La durée de vie du réseau

Nous avons défini la durée de vie du réseau comme étant la durée d'épuisement des nœuds capteurs par round jusqu'à la mort du premier nœud, de même pour un pourcentage de 25% et 50%. Enfin pour le dernier nœud mort dans le réseau.

4.8.5 Résultats de simulation

La station de base est fixée au départ en une position (50,175) et les nœuds capteurs sont déployés aléatoirement sur une surface de (100*100) m² comme la montre la figure suivante :

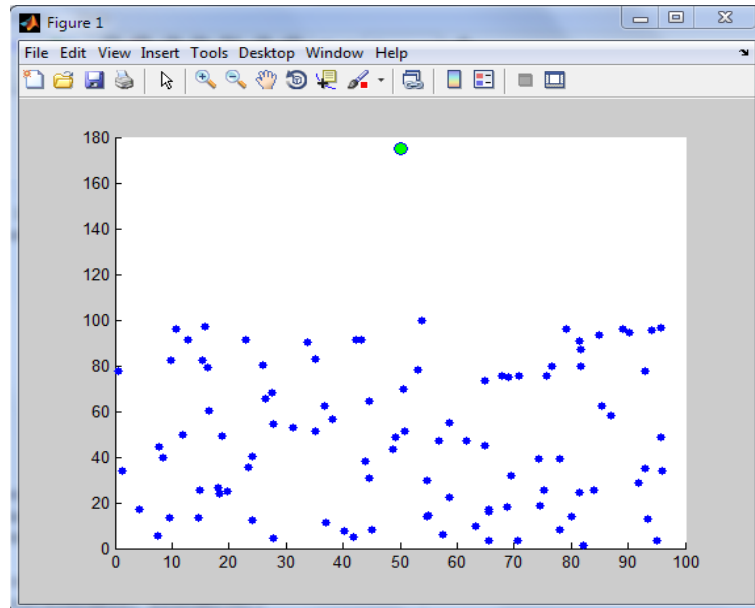


FIGURE 4.4 – Déploiement des nœuds.

1. Consommation d'énergie

La figure ci-dessous le graphe sur l'adroite représente la somme d'énergie restante dans le réseau et le graphe sur la gauche représente le nombre des nœuds morts par round. D'après cette figure, nous remarquons que la somme d'énergie restante dans notre protocole (LEACH-G) est toujours plus grande que la somme d'énergie restante dans LEACH et LEACH-R[31], ainsi que le nombre des nœuds morts. Par conséquent, au bout de 80%, les deux protocoles (LEACH et LEACH-R) dépassent le protocole LEACH-G.

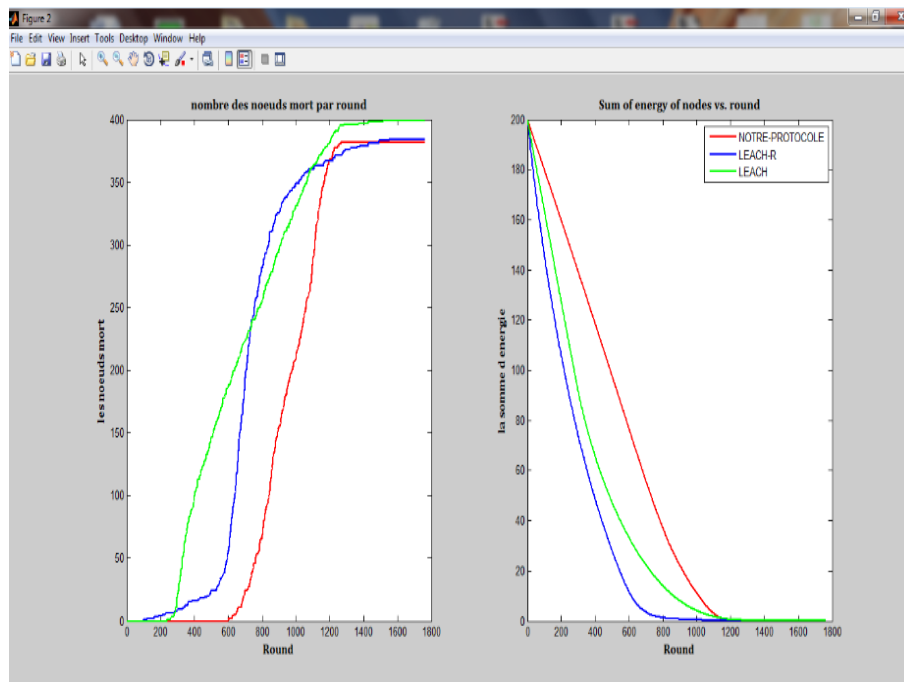


FIGURE 4.5 – La somme de l'énergie restante dans le réseau pour 100 nœud.

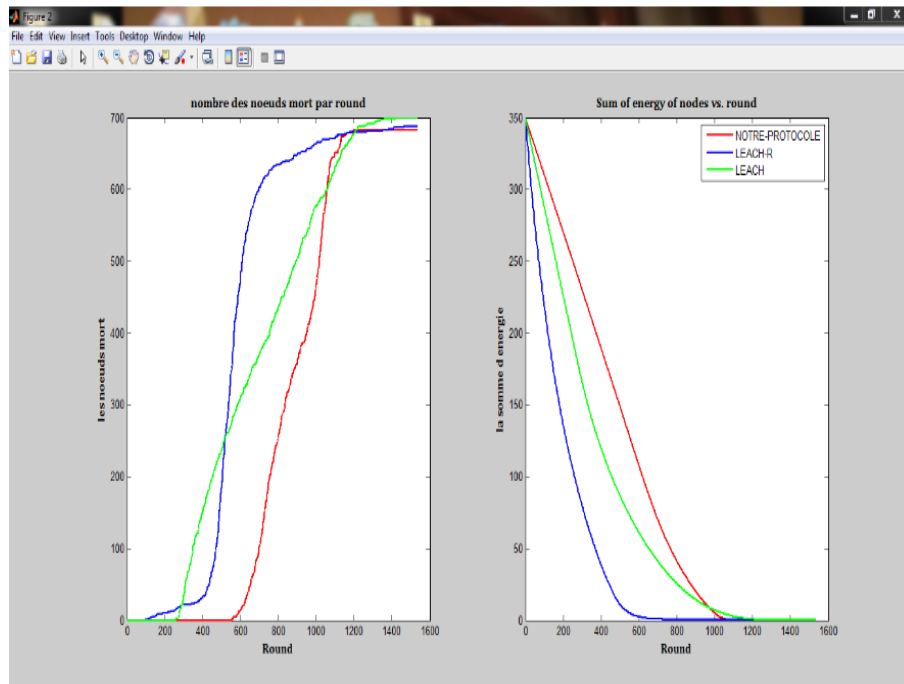


FIGURE 4.6 – La somme de l'énergie restante dans le réseau pour 700 nœud.

2. Durée de vie du réseau

Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction de nombre de nœuds déployés, nous avons suivi l'évaluation de 100 à 1000 nœuds dans le temps.

- **Le premier capteur qui meurt en fonction de nombre de nœuds**

La figure ci-dessous représente le round où le premier nœud meurt avec le déploiement de 100 à 1000 nœuds capteurs.

D'après cette figure, il est clair que la durée de vie du réseau offerte par le protocole LEACH-G est plus grande que les deux autres protocoles (LEACH et LEACH-R) ; cette différence peut être justifié par le principe utilisé dans notre protocole :

l'élection des clusters Head en respectant l'énergie résiduel des nœuds capteurs et le bon choix des chemins offertes par l'algorithme de dijkstra.

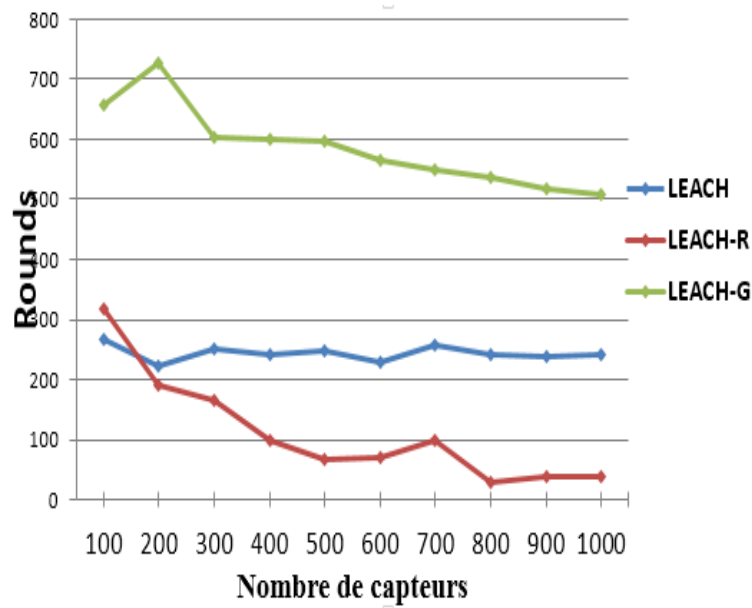


FIGURE 4.7 – le premier de nœuds de capteur en fonction de nombre de nœuds.

• La mort du 25% et de 50% de nœuds capteurs

Ces deux figures représentent la mort du 25% et 50% capteurs par l'évaluation de 100 à 1000 nœuds capteurs. Nous remarquons qu'au départ, pour 100 nœuds capteurs déployés. La durée de vie du réseau pour le protocole LEACH-R est plus grande que celle de LEACH et LEACH-G, mais à l'augmentation de nombre de nœuds (à partir de 200 nœuds) le protocole LEACH-GT est plus performant que les deux autres protocoles (LEACH et LEACH-R) tout au long de la durée de vie du réseau, ce qui signifie que ce protocole vérifie la scalabilité.

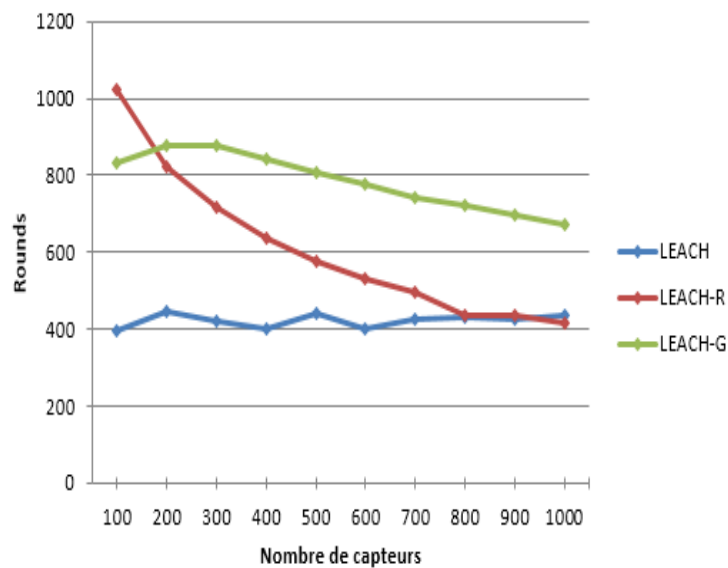


FIGURE 4.8 – la mort du 25% de nœuds de capteur en fonction de nombre de nœuds.

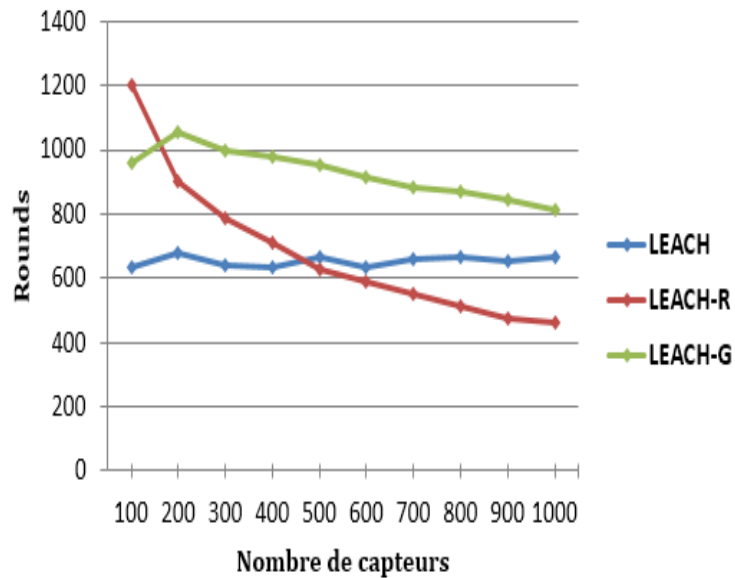


FIGURE 4.9 – la mort du 50% de nœuds de capteur en fonction de nombre de nœuds.

• Le dernier capteur qui meurt en fonction de nombre de nœuds

La figure ci-dessous représente la round où le réseau est mort.

Nous remarquons que les performances de notre protocole sont limitées à un certain nombre qui est égale à 80%. A partir de ce pourcentage, la durée de vie de LEACH-G n'est plus satisfaisante.

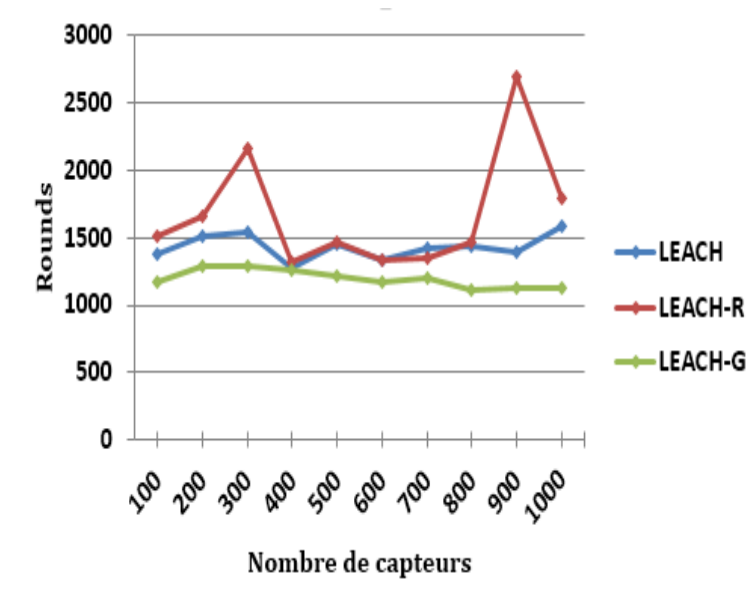


FIGURE 4.10 – le dernier de nœud de capteur en fonction de nombre de nœuds.

4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle approche de routage à basse consommation énergétique appelée LEACH-G. Cette approche est basée sur les deux protocoles hiérarchiques LEACH et EL-LEACH ainsi que l'algorithme de Dijkstra.

D'après les résultats de simulation, nous avons constatés que LEACH-G présente de meilleurs performances en termes de l'énergie consommée ainsi que la prolongation de la durée de vie du réseau.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu un grand succès dès leur apparition dans tous les domaines (militaire, médicale, environnementale, etc.) grâce à leurs diverses fonctionnalités. Cependant, la conception de ces réseaux doit satisfaire quelques contraintes, parmi ces contraintes la limitation de la ressource énergétique qui reste jusqu'à présent leurs défis majeurs.

Dans ce mémoire, nous avons commencé par présenter les généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux Ad-hoc. Puis nous avons étudiés les approches préexistantes dans la littérature afin de proposer une nouvelle approche adaptée au problème de la consommation énergétique. Cette approche est basée sur la clustérisation dynamique où chaque cluster est géré par un cluster Head. Cette méthode permet la distribution de la charge énergétique dans tous les nœuds du réseau. Le protocole utilise trois phases, la phase d'installation qui s'occupe de l'élection des clusters Head ainsi que leurs clusters correspondant, puis il enchaine la phase d'acheminement qui se base sur le prochain saut afin de découvrir la route emprunter vers le destinataire, et finalement il contribue la phase de transmission qui gère les communications entre les nœuds du réseau afin de minimiser les différentes collisions.

Après la description de LEACH-G, nous avons simulé cette proposition par un logiciel MATLAB en comparant avec le protocole original LEACH ainsi que son descendant (LEACH-R) afin de vérifier les performances de notre proposition.

Nous avons constatés à travers ces résultats que LEACH-G présente de meilleures performances en termes de l'énergie consommé et de la durée de vie du réseau, grâce à la clusterisation dynamique assuré par le protocole de routage hiérarchique LEACH, et à l'algorithme de dijkstra qui garantie l'acheminement des données collecté par les nœuds capteurs tout en choisissant un meilleur chemin à emprunté avec un minimum de poids.

Comme perspective de ce travail, nous voulons faire une distribution uniforme des nœuds capteurs dans chaque clusters afin d'évité la surcharge des clusters Head ayons plus de membres de nœuds, de même nous souhaitons éliminer le déploiement aléatoire des nœuds capteurs dans le réseau.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Hadjammar D.Naouel. *Routage dans les réseaux de capteurs :optimisation du protocole Directed Diffusion. PhD thesis*,. Institut National de formation en Informatique INI, Algérie,, 2006.
- [2] F. Theoleyer. *Une auto-organisation et ses applications pour les réseaux ad hoc et hybrides, thèse Docteur*,. l'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQU ?ES DE LYON,, 2006.
- [3] Y. L. K. Fellah and B. Kechar. *Techniques d'optimisation de la consommation d'énergie électrique dans les réseaux de capteurs sans fil*,. Université d'OranEsSénia,, 2007.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su. Y. Sankarasubramaniam, and E. l. Cayirci. *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine,, August 2002.
- [5] Y.Younes. *Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs, thèse de magistère*,. Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-ouzou,, 2012.
- [6] QinghuaWang and I.Balasingham. *Wireless Sensor Networks-An Introduction*,. Application-Centric Design, Geoff V Merrett and Yen Kheng Tan(Ed),ISBN :978-953-307-321-7, InTech,, 2010.
- [7] D.E.Boubiche. *Protocole de routage pour les réseaux de capteur sans fil, Mémoire pour l'obtention du grade de magistère en informatique*,. ,Université l'Hadj Lakhdar-Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur département d'informatique,, 2008.
- [8] S.J and P. Kristofer. *[http ://webs.cs.berkeley.edu/tos/](http://webs.cs.berkeley.edu/tos/)*. TinyOS, 2009.
- [9] B.Krishnamachari. *Networking Wireless Sensors Networks*,. Cambridge University Press,, 2005.
- [10] I. F. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam W. Su, and E. Cayirici. *A survay on sensor networks*,. Commun. ACM, pp. 102-114, August2002.
- [11] T. Nagy, J.Tick, and SACI. *Intelligent sensor networks in the military and civil sectors. In 5th Interna tional Symposium on Applied Computational Intelligence and In formatics.IEEE, page 471-474*,. Timisoara, Romania, May 28-29, 2009.

- [12] Mohammad M. Hamdi, N. Boudriga and S. O. Whomoves. *An optimized broadband sensor network for military vehicle tracking. Int. J. Communication Systems*, 21(3) : 277-300. 2008.
- [13] A.Milenkovic et al. *Wireless sensor networks for personal health monitoring. Issues and an implementation*, Elsevie, 2006.
- [14] G.Schaefer and M.Vetterli O.Couach and M.Parlange. Sensorscope F. Ingelrest, G.Barrenetxea. *Application-specific sensor network for environmental monitoring. ACM Transactions On Sensor Networking*. 2010.
- [15] T.Hasiotis O.Sekkas V.Tsetsos, G.Alyfantis and S.Hadjiefthymiades. *Commercial wireless sensor networks : Technical and business issues. In 2nd International Conference on Wireless on Demand Network Systems and Service (WONS 2005)*,. St. Moritz, Switzerland, pages 166-173. IEEE Computer Society, 19-21 January 2005.
- [16] K. Benahmed. *La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil* . 2006.
- [17] N. Mitton. *Auto-organisation dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle*. Thèse de Doctorat en Informatique et Réseaux de l'INSA de Lyon, INRIA Rhone Alpes, Lyon, France,, Mars 2006.
- [18] T. Nieberg, S. Dulman, Lodewijk P. Havinga, v. Hoesel, and J. Wu. *Collaborative Algorithms for Communication in Wireless Sensor Networks*. 2003.
- [19] I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, and E.Cayirci. *Wireless sensor networks : a survey, Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*. v.38 n.4, pp.393-422, 2002.
- [20] A.Sinha and A.Chandrakasan. *Dynamic power management in wireless sensor networks, IEEE Design and Test of Computers*,. 2001.
- [21] I.F. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam W. Su, and E. Cayirci. *Wireless sensor networks : a survey*. .BWNL, SECE, GIT, Atlanta, USA, 20 December 2001.
- [22] M.T.Tahia and F.Wang. *Coverage problems in wireless sensor networks : designs and analysis*. International journal of Sensor Networks, Vol. 3, No. 3, P. 191-200, 2008.
- [23] K. Akkaya and M. Younis. *A survey on routing protocols for wireless sensor networks*. Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, 2005.
- [24] E. Yoneki and J. Bacon. *A survey of wireless sensor network technologies : Research trends and middleware's role*. Technical Report, No. 646, Computer Laboratory, UCAMCL-TR-646 ISSN 1476-2986,, Septembre 2005.
- [25] Y.C. Tseng S.L. Wu. *Wireless Ad Hoc Networking : Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks*. USA, Auerbach publications, ISBN : 0-8493-9254-3,, 2007.
- [26] K. Akkaya and M. Younis. *A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks*. Department of Computer Science and Electrical Engineering University of Maryland, Baltimore County Baltimore, MD 21250 ,, 2003.

- [27] R. Marin Perianu. , *Wireless Sensor Networks in Motion : Clustering Algorithms for Service Discovery and Provisioning*, thèse de doctorat. University of Twente,, 2008.
- [28] A. Chandrakasan W. Heinzelman and H. Balakrishnan. *Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks*. Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014,, Janvier 2000.
- [29] S.MOAD. *La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Etude bibliographique Master 2 Recherche en informatique IFSIC*. - Rennes 1, France,, 2008.
- [30] O.Younis and S.Fahmy. *Heed :A Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks*. IEEE Transaction on Mobile Computing, March 2004.
- [31] N. WANG and H. ZHU. *An Energy Efficient Algorithm Based on LEACH Protocol*. Conference en Computer Science and Electronics Engineering, 2012.
- [32] D. Braginsky and D. Estrin. *Rumor Routing Algorithm For Sensor Networks*. In Proc. ACM Mobicom, Atlanta, Georgia, USA, Septembre 2002.
- [33] S. LINDSEY and C-S. RAGHAVENDRA. *Pegasis : Power efficient gathering in sensor information systems*. In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, volume 3, 2002.
- [34] J. Heidemann Y. Xu and D. Estrin. *Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing*. Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 70-84, ACM Press New York, NY, USA,, 2001.
- [35] N. Thepvilojanapong. *A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks*. PhD Thesis, A Dissertation Submitted to the Department of Information and Communication Engineering,the University of Tokyo,, Décembre 2005.
- [36] J.D.Estrin Xu, Y.Heidemann. *Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing*. In : *The Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001)*,. Rome, Italy, July 2001.
- [37] J.Kulik W.Heinzelman and H.Balakrishnan. *Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks*. In :. Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 1999), Seattle, WA, August 1999).
- [38] D. Estrin Y. Yu and R. Govindan. *Geographical and Energy-Aware Routing : A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks*. UCLA Computer Science Department Technical Report. UCLACSD TR010023,, May 2001.
- [39] J. N. AlKarak and A. E. Kamal. *Routing techniques in wireless sensor networksn : A survey*. IEEE Wireless Communication, pages 628, DECEMBER 2004.
- [40] and J. Pottie K. Sohrabi. *Protocols for self-organization of a wireless sensor network*. IEEE Personal Communications, Volume 7, 2000.

- [41] C. Lu T. He, J. A. Stankovic and T. Abdelzaher. *SPEED : A stateless protocol for realtime communication in sensor networks*. Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), pp. 46-55,, 2003.
- [42] C. K. Toh. *Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad-hoc networks,*. IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 6, pp. 138-147, Juin 2001.
- [43] D. Sitmplot-RYL. *Some real-time issues in wireless sensor networks. Technical report, IR-CICA/LIFL*. Université Lille 1 CNRS UMR 8022, INRIA Futurs, Ecole d'été Temps Réel, 2005.
- [44] M. Achir and L. Ouvry. *A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-path source routing protocol (mpsr),*. In ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE), Ile de la Réunion, France, Avril 2005.
- [45] A.P Chandrakasan W.Heinzelman and H.Balakrishnan. *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks*. IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 1, NO. 4, OCTOBER 2002.
- [46] S. Boulefkhar. *Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs*. Thèse Magister ReSyd Béjaia. Algérie, 2006.
- [47] J. Padhye R. Draves and B. Zill. *Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks*. Proceedings of ACM SIGCOM, 2004.
- [48] I. Stojmenovic and X. Lin. *Power aware localized routing in wireless networks, Power*. Vol. 12, No. 11, pp. 1122-1133, 2004.
- [49] A. El Jardali M. u. A. S. G.J. Dechene. *A Survey of Clustering Algorithms for Wirless Sensor Networks*. 2007.
- [50] M.Khelifi. *Optimisation de la consommation de l'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fi,* Mémoire pour l'obtention du grade de Magistère en informatique. Université Abderahmane Mira de Béjaia, 2007.
- [51] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal. *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : a Survey*. In IEEE Wireless Communications, Volume 11, Issue 6, On pages 6-28, ISSN : 1536-284, December 2006-2007.
- [52] D. J. Dechene, A. El Jardali, and A. Sauer M. uccini. *A Survey of Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks*. Project Report, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Western Ontario, Canada, December 2004.
- [53] M. Y. Ameer Ahmed Abbaci. *A survey on clustering algorithms for wirless sensor networks*. 2007.
- [54] L. Mohamed. *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique.,* . s.l. UFC, 2009.

- [55] Thu Ngo Quynh, Kieu-Ha Phung, and Hoan Vu Quoc. *Improvement of Energy Consumption and Load Balance for LEACH in Wireless Sensors Networks*. 2012.
- [56] C. Li G.C. M.Ye and J.Wu. *An Energy Efficient Clustering Scheme in WSN,National Laboratory of NovelSoftware Technology*. Nanjing University, Chiana, 2002.
- [57] L. Subramanian and R. H. Katz. *An architecture for building self configurable systems*. Proceedings of the IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing,pp. 63-73, 2000.
- [58] Yong Wang and B.Ramamurthy. *Layered Clustering Communication Protocol for Wireless Sensor Networks*. Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks, 844-849, 2007.
- [59] Y.Zhuang Qi Yang and Hui LI. *An Multi-hop Cluster Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. Journal of Convergence Information Technology, Volume 6, Number 3 ,, Mars 2011.
- [60] M.Rigo. *Théorie des graphes,Deuxièmes bacheliers en sciences mathématiques,*. Université de Liège, 2009,2010.
- [61] <http://www.nimbustier.net/publications/dijkstra/dijkstra.html>.
- [62] Alfred and A.Manuel. *Atelier d'outils informatiques pour la physique (InfoPhys),Eléments de MATLAB*. Département de la Physique de la Matière Condensée, université de Genève., 15 October 2004.
- [63] Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans l*. DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE, Le 28 Septembre 2009.
- [64] N.Sadagopan et al. *The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks*. In : *Proc. 1st Int'l. Wksp. Sensor Network Protocol and Apps,*. Anchorage,AK, May 2003.
- [65] J.Y. Li, L.Halpern. *Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited*. In :IEEE ICC 2001, vol. 1, pp. 278-283,, 2001.

Résumé

Avec l'émergence des nouvelles technologies, on a vu l'apparition d'un nouveau type de réseau qui est les réseaux de capteur sans fil.

Ce type de réseau peut être considéré comme un sous-ensemble des réseaux Ad-hoc. Des contraintes spécifiques s'appliquent alors aux utilisateurs de ces réseaux, telles que la gestion des ressources limitées qui caractérisent les capteurs, et qui à une grande influence sur la durée de vie du réseau. L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle approche de routage à basse consommation énergétique tout en améliorer le protocole hiérarchique LEACH et EL-LEACH afin de distribuer la charge dans tous le réseau, et en formalisant la topologie du réseau sous forme d'un graphe complet, puis en appliquant l'algorithme de Dijkstra afin de trouver le meilleur chemin en terme d'énergie.

Nous avons simulé notre proposition avec le simulateur MATLAB en comparant les résultats obtenu avec les protocoles déjà existés. Ces résultats ont montré que les performances de notre proposition est plus performante en terme de leur consommation d'énergie.

Mots-clés :

Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de routage hiérarchique, clusterisation dynamique, Consommation d'énergie, LEACH, LEACH-R.

Abstract

With the emergence of the new technologies, we saw the appearance of a new type sensor of network who is the networks of wireless sensor. This type sensor of network can be considered as an Ad hoc subset of networks.

Specific constraints apply then to the users of these networks, such as the management of limited resources which characterize the sensors and which a big influence on the life expectancy (cycle) of the network has.

The objective of this work is to propose a new approach while improve hierarchical protocol LEACH and LEACH-G to distribute the energy in all the network, and formalizing the network topology in the form of a complete graph, then applying Dijkstra's algorithm to find the best route in terms of energy.

We simulated our proposal with a simulator programmed in MATLAB by appearing the results obtained with protocols already existed. This results showed that the performance of our proposal is a high performance to forward of their energy consumption.

Keywords :

Wireless sensor networks, hierarchical routing protocol, dynamic clustering, energy consumption, LEACH, LEACH-R.