

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

Le routage multi-chemins avec économie
d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Réalisé par :

M^r HAFIR Hakim
M^r HALLOUCHE Hamanou

Devant le jury composé de :

Président : M^{elle} HAMZA Lamia
Examinatrice : M^{elle} REBOUH Nadjette
Examinatrice : M^{elle} TASSOULT Nadia
Promotrice : M^{elle} BOULFEKHAR Samra.

PROMOTION 2013

Remerciements

NOUS remercions Dieu le tout Puissant qui nous a donné la force et la volonté pour réaliser ce mémoire.

Nous tenons à remercier ardemment toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce mémoire. Merci à tous ceux qui nous ont apporté leur aide, chacun à sa manière, surtout mon ami AZIB Mohend Larbi, et monsieur IDER Omar.

Notre gratitude va aussi aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier également notre promotrice.

Un grand merci à tout(e)s mes ami(e)s sans exception. Nous remercions bien sûr nos chers parents et notre famille en général, qui nous ont toujours supportés moralement et financièrement pendant toutes nos longues années d'études.

Nous tenons à remercier ardemment toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce mémoire. Merci à tous ceux qui nous ont apporté leur aide, chacun à sa manière, surtout mon ami AZIB Mohend Larbi, et monsieur IDER Omar.

Notre gratitude va aussi aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier également notre promotrice.

Un grand merci à tout(e)s mes ami(e)s sans exception. .

Zazi & Haha

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A la mémoire de mon frère,

A mes chers parents,

A toute ma famille,

A mon binôme Hakim et sa famille.

A mes amis, collègues et à toutes les personnes que j'ai connues, MERCI à tous.

HALLOUCHE Hamanou

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents,

A mes frères et sœurs ,

A toute la famille,

A mon binôme Hamanou et sa famille.

A mes amis, collègues et à toutes les personnes que j'ai connues et qui m'ont aidées.

HAFIR Hakim

Résumé

LE routage de données dans les réseaux de capteurs sans fil (*RCSFs*) est reconnu comme un domaine de recherche très actif vu les spécificités de ce type de réseau, où la consommation de l'énergie est considérés comme un défi majeur des protocoles de communication proposés.

Notre contribution consiste en un protocole de routage multi-chemin, qui garantit la livraison des paquets dans le réseau, où le capteur est allégé de toute décision concernant le routage. C'est à la station de base de calculer toutes les routes et choisir à chaque fois celle qui est optimale pour un bon acheminement des informations, afin d'équilibrer la charge et d'augmenter la durée de vie du réseau en minimisant la consommation énergétique.

La simulation a montré que les résultats fournis par notre protocole sont très compétitifs, et ce en minimisant la consommation énergétique afin d'augmenter la durée de vie du réseau.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Routage multi-chemins, Consommation d'énergie.

Abstract

DATA routing in wireless sensor networks (WSNs) is a very active area of research given the specificities of this type of networks, where the consumption of energy is considered as the major challenge for the available communication protocols.

Our contribution is a protocol for multi-path routing, which guarantees the delivery of packets in the network, where the sensor is relieved of any decision concerning the routing. It is at the base station to calculate all the paths and choose each time which is optimal for a correct routing of informations, to balance the load and increase the lifetime of the network by minimizing energy consumption.

The simulations showed that the results provided by our protocol are very competitive, and this by minimizing the energy consumption in order to increase the lifetime of the network.

Keywords : sensor network, Routing, Multipath routing, Energy consumption.

Table des matières

Table des matieres	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des Acronymes	vi
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)	3
1.1 Introduction	3
1.2 Le capteur	3
1.2.1 Définition d'un capteur	3
1.2.2 Architecture d'un capteur	4
1.2.2.1 Unité de captage	4
1.2.2.2 Unité de traitement	5
1.2.2.3 Unité de transmission	5
1.2.2.4 Unité de control d'énergie	5
1.3 Réseaux de capteurs sans fil	5
1.3.1 Définition d'un réseau de capteurs	5
1.3.2 Architecture du réseau	6
1.3.2.1 Architecture plate ou horizontale	6
1.3.2.2 Architecture hiérarchique	7
1.3.3 Caractéristiques du réseau de capteurs	7
1.3.3.1 Durée de vie limitée	7
1.3.3.2 Ressources limitées	7
1.3.3.3 Topologie dynamique	7
1.3.3.4 Scalabilité	7
1.3.3.5 Déploiement aléatoire et dense	7
1.3.3.6 Auto-organisation	8
1.3.3.7 Sécurité limitée	8
1.4 Contraintes liées aux réseaux de capteurs	8
1.5 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil	10
1.5.1 Types de communications dans les réseaux de capteurs	10
1.5.2 Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs	11
1.5.2.1 La couche physique	11

1.5.2.2	La couche liaison de données	11
1.5.2.3	La couche réseau	12
1.5.2.4	La couche transport	12
1.5.2.5	La couche application	12
1.6	Domaines d'application	13
1.7	Conclusion	16
2	 Routage dans les RCSFs	17
2.1	Introduction	17
2.2	Facteurs de conception de protocoles de routage	17
2.2.1	déploiement des capteurs	18
2.2.2	Modèle de livraison de données	18
2.2.3	Hétérogénéité des nœuds/liens	18
2.2.4	Qualité de service	19
2.2.5	Agrégation/fusion de données	19
2.2.6	Dynamisme du réseau et mobilité	19
2.2.7	Consommation d'énergie	19
2.2.8	Tolérance aux fautes	20
2.2.9	Scalabilité	20
2.2.10	Média de transmission	20
2.2.11	Connectivité	20
2.2.12	Couverture	21
2.3	Consommation d'énergie dans les RCSF	21
2.3.1	Energie de capture	21
2.3.2	Energie de traitement	21
2.3.3	Energie de communication	21
2.4	Classification et approches des protocoles de routage pour les RCSFs	22
2.4.1	Selon la structure du réseau	23
2.4.1.1	Les protocoles à plat	23
2.4.1.2	Les protocoles hiérarchiques	23
2.4.1.3	Les protocoles basés sur la localisation géographique	24
2.4.2	Selon les fonctions des protocoles	24
2.4.2.1	Le routage basé sur la Qualité de Service	24
2.4.2.2	Le routage basé sur le flux de données	25
2.4.2.3	Le routage basé sur les multi-chemins	25
2.4.2.4	Le routage basé sur la négociation	25
2.4.3	Selon l'établissement de route	26
2.4.3.1	Les protocoles proactifs	26
2.4.3.2	Les protocoles réactifs	26
2.4.3.3	Les protocoles hybrides	27
2.4.4	Selon l'initiateur de communication	27
2.4.4.1	La communication lancée par les nœuds sources	27
2.4.4.2	La communication lancée par les nœuds destinataires	27
2.5	Conclusion	28

3	Etat de l'art sur les protocoles de routage Multipath dans les RCSFs	29
3.1	Introduction	29
3.2	Protocoles de routage multi-chemins à basse consommation d'énergie	29
3.2.1	Directed Diffusion (DD)	30
3.2.2	Energie Aware Routing(EAR)	31
3.2.3	Robust and Energy-Efficient Multi-path Routing (REER)	32
3.2.4	Micro Sensor Multi-Path Routing Protocol(MSMRP)	34
3.2.5	Energy-Balancing Multipath Routing(EBMR)	35
3.2.6	Improved Energy Aware and Two Hop Multipath Routing(IEATH)	36
3.2.7	Energy Aware Multi-Hop Multi-Path Hierarchical(EAMMH)	37
3.2.8	Sink-initiated Multipath Routing Protocol(SIMR)	38
3.2.9	QoS and energy-aware multipath routing(QEMPR)	39
3.2.10	MultiPath Load-Balanced(MP-LB)	39
3.3	Comparaison des protocoles de routage multi-chemins	41
3.4	Conclusion	42
4	Nouveau protocole de routage multi-chemins	43
4.1	Introduction	43
4.2	Motivations	43
4.3	Objectif	44
4.4	Hypothèses	44
4.5	Fonctionnement du protocole	44
4.5.1	Phase de découverte de la topologie	45
4.5.2	Phase de communication des données	47
4.6	Evaluation des performances	53
4.6.1	Les simulateurs des RCSFs Actuellement disponibles	53
4.6.2	Modèle énergétique	55
4.6.3	Paramètres de simulation	55
4.6.4	Les métriques d'évaluation	56
4.6.5	Discussion des résultats	58
4.7	Conclusion	62
	Conclusion générale et Perspectives	63
	Bibliographie	65

LISTE DES FIGURES

1.1	Exemple d'un capteur	4
1.2	Architecture d'un capteur [8].	4
1.3	Exemple de RCSF [1].	6
1.4	Les couches de la pile protocolaire [1].	11
1.5	Exemple d'application d'un RCSF dans le domaine militaire.	13
1.6	Contrôle de l'irrigation d'une plantation.	14
1.7	Contrôle d'un cœur dans le corps humain.	15
1.8	Application des RCSF dans un appartement.	16
2.1	Classification des protocoles de routage [23].	22
3.1	Les phases du protocole Directed Diffusion [45].	31
3.2	La procédure de dissémination de RREQ en MSMRP [66].	35
4.1	consommation d'énergie en terme du temps.	58
4.2	Consommation d'énergie en terme du nombre de nœuds.	59
4.3	Taux du succès par rapport au nombre de nœuds t.	59
4.4	Taux du succès par rapport au temps de simulation.	60
4.5	Nombre de nœuds en vie en terme du temps de simulation.	60
4.6	Latence moyenne en terme du nombre de nœuds.	61

Liste des tableaux

3.1	Tableau comparatif des différents protocoles étudiés [57].	41
4.1	Exemple de table de routage.	46
4.2	Paramètres de simulation.	56

Liste des Acronymes

APTEEN	A daptatif T hreshold sensitive E nergy E fficient sensor N etwork protocol.
CSMA	C arrier S ense M ultiple A ccess.
DD	D irected D iffusion.
EAR	E nergy A ware R outing.
REER	R obust and E nergy- E fficient M ulti-path R outing .
MSMRP	M icro S ensor M ulti- P ath R outing P rotocol.
EBMR	E nergy- B alancing M ultipath R outing.
IEATH	I mproved E nergy A ware and T wo H op M ultipath R outing.
EAMMH	E nergy A ware M ulti- H op M ulti- P ath H ierarchical.
SIMR	S ink- I nitiated M ultipath R outing P rotocol.
QEMPR	Q oS and E nergy-aware M ultipath P rotocol R outing.
MP-LB	M ulti P ath L oad- B alanced.
GPS	G lobal P ositioning S ystem.
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy.
OMNET++	O bjective M odular N etwork T est-bed in C++ .
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers .
MAC	M edia A ccess C ontrol .
NS-2	N etwork S imulator 2 .
PEGASIS	P ower- E fficient G Athering in S ensor I nformation S ystem .
QoS	Q ualité de S ervice .
QoS	Q uality of S ervice .
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il .
SAR	S equential A ssignement R outing .
SB	S tation de B ase .
SPIN	S ensor P rotocols for I nformation via N egotiation .
TDMA	T ime D evision M ultiple A ccess .
RR	R umor R outing.
CH	C luster H ead.

Introduction générale

LES technologies sans fil offrent des nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications et des réseaux de communication. Les progrès réalisés ces dernières décennies sont couronnés par l'apparition des réseaux mobiles sans infrastructure, appelés les réseaux Ad-hoc.

Le réseau de capteurs sans fil, un type particulier de réseaux Ad-hoc, a vu le jour grâce au développement de la micro-électronique et la miniaturisation croissante de composants électroniques, il est composé d'un ensemble de dispositifs minuscules appelés « capteurs » qui permettent de traiter et communiquer les informations après les avoir récolté à partir d'un environnement souvent hostile et dur. La batterie est un composant important d'un capteur. En général, elle n'est ni remplaçable ni rechargeable. Elle fournit une quantité d'énergie très limitée qui limite ainsi la durée de vie du capteur et influe sur le fonctionnement global du réseau. Cependant, le succès qu'a connu ce type de réseau est dû essentiellement aux diverses possibilités d'utilisation dans de nombreux domaines : scientifique, logistique, militaire, etc. beaucoup de recherches ont été menées ces dernières années, plus particulièrement sur les différentes couches protocolaires. Celles-ci visent essentiellement deux objectifs : optimisation de la consommation énergétique et garanti de la qualité de livraison de données (taux d'erreur). Pour atteindre les deux objectifs cités ci-dessus, un des défis majeurs rencontrés dans ce type de réseaux est le développement des protocoles de routage efficaces pouvant garantir une communication de qualité entre les différents nœuds du réseau. De nombreux protocoles de routage ont été proposés ces dernières années qui cherchent à trouver des algorithmes et des techniques efficaces en termes d'énergie, afin que la durée de vie du réseau soit maximisée. Cependant, une limitation de ces protocoles mono-chemin « unipath » est qu'ils ne construisent qu'une seule route entre la source et la destination. Ainsi, lorsque la route ne sera pas disponible, les nœuds intermédiaires suppriment les paquets de données, car ils ne disposent pas d'une route alternative. Pour reprendre la transmission, la source sera obligée de lancer une nouvelle découverte de route, ce qui entraîne une augmentation du délai. Une autre approche de protocoles permet de construire et de maintenir plusieurs routes entre la source et la destination. Ce sont des protocoles multi-chemins « multipath ». Ces derniers servent à augmenter la robustesse et la disponibilité des routes afin d'assurer plus de fiabilité et d'économiser l'énergie consommée dans le réseau.

L'objectif de notre travail est de évaluer un protocole de routage multi-chemins avec économie d'énergie. Ces chemins multiples peuvent êtres exploités soit d'une manière alternative afin d'assurer une fiabilité de transmission de données, c'est-à-dire, à un moment donné un seul chemin sera choisi, soit simultanément pour l'équilibrage des charges dans le réseau.

Structure du mémoire :

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre représente une partie introductive pour les réseaux de capteurs, nous présentons, leurs caractéristiques, leurs applications et les facteurs influant sur consommation d'énergie dans ces réseaux.

Dans le deuxième chapitre, nous parlerons de routage dans les RCSFs et nous présentons une classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs.

Dans le troisième chapitre, nous étalerons un état de l'art sur les protocoles de routages multi-chemins dans les RCSF qui ont été proposés pour gérer la communication et la transmission des données.

Le quatrième chapitre est consacré au protocole que nous avons proposé, après avoir étudié quelques protocoles de routage multi-chemins, ainsi une simulation de ce protocole et le protocole MEERP avec lequel nous allons le comparer, dont les résultats de simulation ont été retournés et discutés.

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL (RCSFs)

1.1 Introduction

Au cours de ces dernières décennies, la technologie des réseaux mobiles n'a cessé de se développer et a connu un attrait croissant pour un nouveau type de réseaux ad hoc : les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), ou Wireless Sensor Network (WSNs). Ce type est composé d'un ensemble d'unités de traitements embarquées, appelées "capteurs", communiquant via des liens sans fil. Le but général d'un WSN est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement entourant les capteurs, tels que la température ou la pression de l'atmosphère, afin de les acheminer vers des points de traitement.

Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil et ce en décrivant leur architecture, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application, les contraintes de conception d'un tel type de réseaux ainsi que le type de communication utilisée.

1.2 Le capteur

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un petit dispositif électronique autonome servant à la surveillance et au contrôle d'un phénomène donné. Il est capable d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique (température, humidité, lumière, pression, etc.), le traitement éventuel de cette information, et la communication avec d'autres capteurs [1, 2]. Deux types de nœuds capteurs peuvent être distingués : nœuds capteurs et nœuds puits [1]. Un nœud capteur détecte les phénomènes physiques et surveille son environnement immédiat pour transmettre les données captées au nœud puits. Ce dernier les collecte, les stocke et les analyse pour communiquer les résultats à d'autres réseaux auxquels il est connecté via Internet ou par Satellite[1, 10].

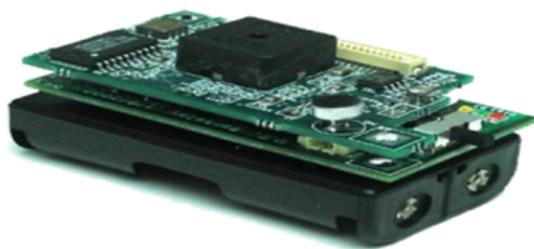


FIGURE 1.1 – Exemple d'un capteur

1.2.2 Architecture d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Cependant, malgré cette diversité apparente, il reste doté d'une architecture matérielle similaire qui est composé de plusieurs éléments ou modules correspondant chacun à une tâche particulière[1, 6]. Il contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie .

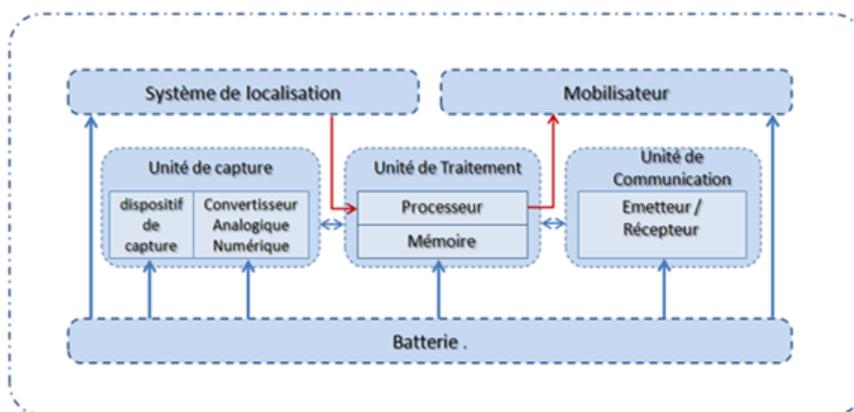


FIGURE 1.2 – Architecture d'un capteur [8].

1.2.2.1 Unité de captage

La fonction principale de l'unité de capture est l'acquisition des données auprès de l'environnement surveillé. Cette unité se compose généralement de deux sous-unités : le dispositif de capture et un convertisseur analogique-numérique. Le dispositif de capture communique les données récoltées depuis son environnement sous forme d'un signal analogique au convertisseur analogique-numérique. Ce dernier convertit le signal reçu en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [1, 10].

1.2.2.2 Unité de traitement

L'unité de traitement est à la charge du contrôle des capteurs et la gestion des procédures et protocoles de communication [8, 7]. Généralement, elle est associée à une petite unité de stockage, exécute les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour effectuer la tâche assignée au réseau. En ce qui concerne le stockage, la mémoire flash reste la plus utilisée en raison de son faible coût et sa capacité de stockage. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits [9, 10].

1.2.2.3 Unité de transmission

L'unité de communication se charge d'effectuer toutes les émissions et réceptions de données sur un medium sans fil entre le nœud capteur et son environnement extérieur. Elle peut être de type optique, ou de type radio-fréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Les unités de transmission de type radio-fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage, ce qui implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur [12, 9].

1.2.2.4 Unité de control d'énergie

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Cette unité effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur, et elle peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé tels que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau [11, 4].

En plus des quatre unités, citées ci-dessus, un nœud capteur peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité [12, 11].

1.3 Réseaux de capteurs sans fil

1.3.1 Définition d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil sont un type particulier de réseau Ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des « capteurs intelligents ». Ils se composent généralement d'un grand nombre de capteurs dont le nombre varie de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Ils se communiquent entre eux via des liens sans fil pour le partage d'information et

le traitement coopératif. Ces capteurs sont placés d'une manière plus ou moins aléatoire dans des environnements pouvant être dangereux où l'intervention humaine, après le déploiement des nœuds capteurs, est la plupart du temps exclue. le but de celui-ci est de surveiller une zone géographique, et parfois d'agir sur celle-ci (il s'agit alors de réseaux de capteurs-actionneurs). On peut citer comme exemples un réseau détecteur de feu de forêt, ou un réseau de surveillance de solidité d'un pont après un tremblement de terre, etc [1, 14].

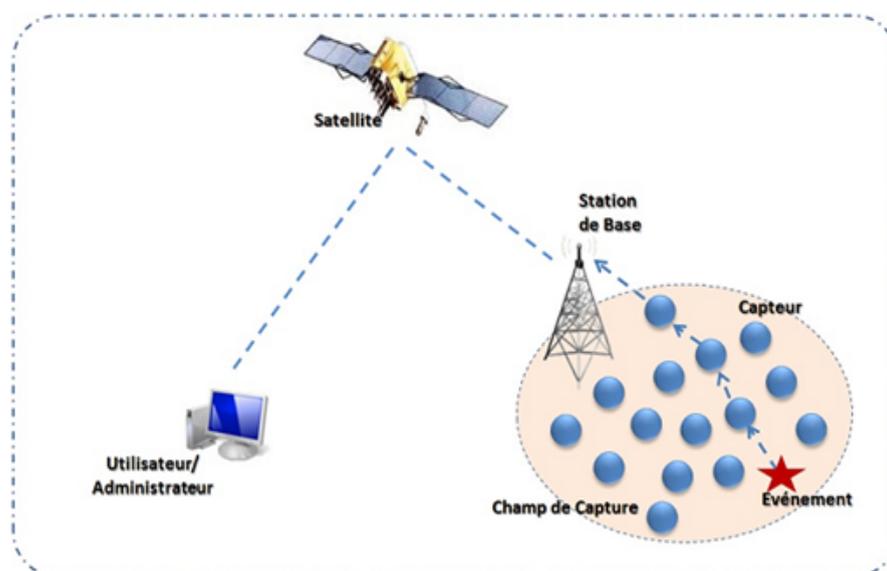


FIGURE 1.3 – Exemple de RCSF [1].

1.3.2 Architecture du réseau

Il existe deux schémas de configuration des capteurs qui influent étroitement sur les protocoles de communication [23, 5, 10, 60] :

1.3.2.1 Architecture plate ou horizontale

Un réseau de capteurs plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de complexité du matériel et ils ont un même niveau qui leur permet de communiquer avec tous les autres capteurs. On peut distinguer deux schémas :

- **Centralisé**

Toutes les données capturées par les capteurs sont envoyées vers un capteur central qui fait le traitement et la fusion des données pour les transmettre à la station de base. Ce schéma est très simple et il est utilisé seulement pour des réseaux de petite densité[5, 10].

– **Distribué**

Plusieurs capteurs de traitement de données existent et peuvent communiquer entre eux. Un groupe de capteurs récoltent chacun de leur côté les données du réseau et les communiquent entre eux jusqu'à l'acheminement à la station de base.

1.3.2.2 Architecture hiérarchique

Le réseau est découpé en clusters, où dans chaque cluster un Cluster-Head est élu pour gérer les communications. Toutes les données reçues d'un niveau inférieur sont traitées et agrégées par les cluster-heads de ce niveau avant d'être transmises vers le niveau supérieur.

1.3.3 Caractéristiques du réseau de capteurs

En plus de celles qu'ils héritent des réseaux Ad Hoc, les RCSFs présentent d'autres caractéristiques[16, 17] :

1.3.3.1 Durée de vie limitée

Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent habituellement sans surveillance dans des régions géographiques éloignées. Par conséquent, recharger ou remplacer leurs batteries devient impossible[19, 22].

1.3.3.2 Ressources limitées

Habituellement les nœuds capteurs ont une taille très petite, ce facteur de forme limite la quantité de ressources qui peuvent être mises dans ces nœuds. Par conséquent, la capacité de traitement et de mémoire devient très limitée [4, 19].

1.3.3.3 Topologie dynamique

Comme les capteurs et la station de base peuvent être mobiles, et qu'ils peuvent être déployés dans des environnements hostiles, où la défaillance d'un capteur est très probable, alors la topologie du réseau fréquemment changeable.

1.3.3.4 Scalabilité

Le nombre de nœuds capteurs peut être de l'ordre de centaines ou de milliers (selon l'application)[14, 22].

1.3.3.5 Déploiement aléatoire et dense

Dans un RCSF, les capteurs sont généralement déployés d'une façon dense et plus ou moins aléatoire. La forte densité est souvent liée à des raisons de fiabilité.

1.3.3.6 Auto-organisation

Pour remédier au problème de changement non prédictible de topologie, une auto-organisation du réseau s'avère nécessaire. C'est-à-dire que les nœuds doivent savoir localiser leurs voisins et établir des routes pour que l'information puisse circuler à travers le réseau.

1.3.3.7 Sécurité limitée

Les contraintes et limitations physiques font que le contrôle des données transférées doit être minimisé. De plus, les réseaux de capteurs sans fils sont plus sensibles aux attaques qui menacent les données transmises en raison de l'absence d'infrastructure.

1.4 Contraintes liées aux réseaux de capteurs

- **La consommation d'énergie**

Un capteur, est un dispositif microélectroniques, qui sont limités en termes de source énergétique. Par conséquent la durée de vie du nœud est limitée [1, 7]. Dans la plupart des cas, le remplacement de la batterie est impossible, ceci dit que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de sa batterie. Etant donné que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois le rôle d'initiateur de données et de routeur. Le dysfonctionnement d'un certain nombre de nœuds, entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs.

Il existe diverses sources de consommation d'énergie, les principales sont liées aux activités d'observation, de traitement et de communication. Des mesures expérimentales ont montré que, généralement, la communication est très coûteuse énergétiquement, tandis que le traitement des données consomme une quantité d'énergie moins importante [8, 7, 4, 26].

- **La localisation**

La localisation c'est déterminer la position d'un objet à localiser avec des partie intelligente. La réalisation d'un système de localisation implique une infrastructure contenant un ensemble des capteurs permettant d'acquérir les informations nécessaires sous diverses formes (acoustique, électrique, etc.) [21, 4, 18].

- **Le routage**

Les réseaux de capteurs sont basés sur un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme l'énergie soit pour transmettre ses données ou pour relayer les données des autres nœuds. Une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau. C'est pour cela, l'énergie est considérée comme ressource très précieuse dans les réseaux de capteurs dont les protocoles de routage doivent en tenir compte [23, 5, 39].

- **Les ressources limitées**

Les nœuds capteurs ont une taille très petite. Se facteur de forme limite la quantité de ressources qui peut être embarqué dans ces nœuds. D'où leurs capacités de traitement et de mémoire sont très limitées [1, 24].

- **La tolérance aux fautes**

La tolérance aux fautes est la capacité d'un réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions lorsqu'un capteur cesse de fonctionner [23, 25]. En effet la défaillance de Certains nœuds capteurs ne doit pas affecter la tâche globale du réseau[39].

- **Le passage à l'échelle (scalabilité)**

la surveillance d'un phénomène peut nécessiter le déploiement d'un grande nombre de nœuds à savoir plusieurs milliers de 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 de capteurs élevé. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs. Cette densité peut varier entre quelques capteurs jusqu'à plusieurs centaines dans une région de taille inférieure à dix(10) mètres de diamètre [23, 14, 25].

- **Les coûts de production**

Les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le coût d'un seul capteur est très important pour justifier le coût total du réseau. C'est à dire que le coût du réseau ne doit pas dépasser le coût du déploiement d'un réseau traditionnel [23, 15, 33].

- **L'environnement**

Les capteurs doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions relativement éloignées ou hostiles. Parce qu'ils sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que les champs de bataille au-de là des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan et dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés. Alors les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité... [11, 9, 15].

- **Topologie du réseau**

La maintenance de la topologie d'un réseau de capteurs est une tâche très complexe a cause des caractéristiques de déploiement aléatoire, le fonctionnement autonome et la fréquence élevée de pannes. En raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds-capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée [1, 23].

- **Les contraintes matérielles**

Comme nous l'avons vu précédemment, un nœud capteur peut contenir d'autres unités dépendantes de l'application du réseau. Ceci rend l'intégration d'une unité, consacrée au système de localisation par exemple, très commune dans un nœud capteur, ou un système de mobilité du capteur pour le déplacer en cas de nécessité. Toutes ces unités peuvent exiger leur intégration dans un boîtier de taille minimale inférieure à un centimètre cube, et avec un poids très léger qui permet aux nœuds de rester suspendus dans l'air, si l'application l'exige [28].

- **Les médias de transmission**

Dans un réseau de capteurs les nœuds sont liés à travers un medium de communication sans fil. Cependant, il doit être compatible avec l'environnement de l'application. Il faut permettre au réseau d'accomplir la totalité de ses tâches. Les unités de transmission intégrées au niveau des capteurs doivent être de petite taille et à faible consommation d'énergie. En effet, les contraintes matérielles imposées à ces capteurs, ainsi que le compromis existant entre l'efficacité des antennes et la consommation d'énergie, limite le choix de la bande utilisée sur les hautes fréquences [23].

1.5 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

1.5.1 Types de communications dans les réseaux de capteurs

En général, dans les WSNs, deux types de nœuds sont identifiés logiquement, les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteurs), et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds (nœuds de relais ou stations de bases). 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 nœud capteur à un nœud 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 (c'est l'organisation du réseau en groupes de capteurs) [29].

- **La communication 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 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. Noter que chaque nœud est équipé d'une radio d'émission/réception [30].

Dans les quatre types de communication, l'énergie est une ressource critique qui fait de l'énergie la consommation une métrique primaire à considérer. De nombreuses techniques d'optimisation, parfois en opposition les unes aux autres, sont étudiées pour minimiser les optimisations, dépenses énergétiques et augmenter la durée de vie du réseau.

1.5.2 Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs

L'architecture de communication dans les réseaux de capteurs est divisée en couches comme dans les réseaux filaires. La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau comprend cinq couches.

Chaque couche a ses rôles et ses protocoles qui opèrent en dessus. Puisque l'objectif d'un réseau de capteurs n'est pas la communication elle même et que la consommation d'énergie est un critère très important, d'autres unités doivent exister afin de gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches comme le montre la figure suivante[1, 22] :

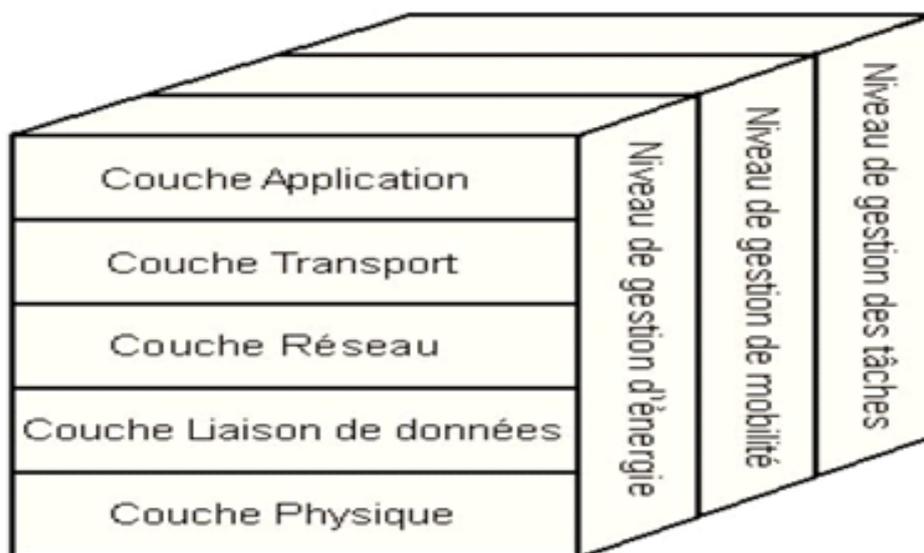


FIGURE 1.4 – Les couches de la pile protocolaire [1].

1.5.2.1 La couche physique

La couche physique intervient généralement dans les techniques d'émission et de réception. La couche physique est responsable de la sélection des fréquences et de la détection d'un signal.

1.5.2.2 La couche liaison de données

Cette couche est responsable du multiplexage des flux de données, de l'accès au médium et le contrôle d'erreur. Elle assure une connexion point à point ou point à multipoint fiable dans une communication réseau. Elle est composée de deux couches :

- **LLC**

couche de contrôle des liens logiques (LLC pour Logical Link Control) elle fournit une interface standard entre les deux couches liaison et réseau en encapsulant encapsule les segments venant de la couche réseau par l'ajout des en-têtes nécessaires, rassemble et fragmente les trames MAC, gère les erreurs et d'adressage.

- **MAC**

couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour Médium Access Control), Puisque l'environnement est bruyant et les capteurs peuvent être mobiles, alors il doit connaître l'état de l'énergie résiduelle et être capable de réduire au minimum les collisions causées par l'émission simultanée des nœuds voisins, pour prolonger la durée de vie de réseau. La couche MAC fournit le partage d'accès au médium et un protocole qui permet l'échange des trames. [1, 34].

1.5.2.3 La couche réseau

Cette couche prend soin de router les données, éventuellement par des communications multi-sauts, fournies par la couche de niveau supérieur [34].

1.5.2.4 La couche transport

La couche transport est spécialement nécessaire quand le système est planifié à être consultée à travers l'Internet. Une approche comme le TCP (Transport Control Protocol) est nécessaire pour interagir les réseaux de capteurs avec d'autres réseaux externes [1].

1.5.2.5 La couche application

Selon les tâches de capture, différents types de logiciels d'application peuvent être établis et employés dans cette couche. Elle assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

- **Le niveau de gestion d'énergie**

Elle consiste à gérer comment un capteur utilise son énergie. 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 capture [1, 19].

- **Le niveau de gestion de mobilité**

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de 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 [1].

- **Le niveau de gestion des tâches**

Lors d'une opération de capture 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 laquelle 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 [1, 5].

1.6 Domaines d'application

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21^{ème} siècle [35], car la recherche dans le domaine des capteurs subit actuellement une révolution importante. Cette nouvelle technologie promet dans beaucoup de domaines de nouvelles applications [1, 24]; nous allons citer ici quelques unes de ces réseaux :

1. Applications militaires

A l'origine, les réseaux de capteurs ont été utilisés pour des objectifs militaires. En effet, le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable pour un tel domaine. Le réseau de capteurs peut être déployé sur un endroit stratégique ou à accès difficile afin de surveiller toute les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection de radiations ou d'agents chimiques) [37, 24]. Un exemple de ce type de scénario est illustré dans la figure suivante :



FIGURE 1.5 – Exemple d'application d'un RCSF dans le domaine militaire.

Dans les applications militaires, les nœuds capteurs devraient fournir des services comme :

- surveillance du champ de bataille.
- Reconnaissance des forces ennemies.
- repérage des cibles.
- évaluation des dommages de la bataille.
- détection et reconnaissance d'attaque nucléaire, biologique et chimique.

2. Applications environnementales

De nos jours, le secteur environnemental a largement bénéficié de la technologie de réseaux de capteurs, les caractéristiques de ces derniers permettent d'envisager plusieurs applications efficaces dans ce secteur [37, 24] :

- Dans les champs agricoles : les capteurs peuvent être semés avec les grains. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc efficace.
- Sur les sites industriels : les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, des capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produit chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace.
- Dans les forêts : des nœuds capteurs peuvent être déployés en masse pour détecter et transmettre l'origine exacte des feux aux gardiens forestiers pour intervenir immédiatement avant que le feu soit incontournable.
- Surveillance de l'environnement marin : ceci inclut la surveillance de la pollution (chimique, biologique, nucléaire) , la surveillance des courants d'eau et du vent pour disposer des prévisions météorologiques, la détections du changement de climat qui sert à mieux comprendre et prévoir les effets des activités humaines sur l'écosystème ainsi la traque des poissons. Exemple de Contrôle de l'irrigation d'une plantation par des capteurs d'humidités illustré sur la figure suivante.

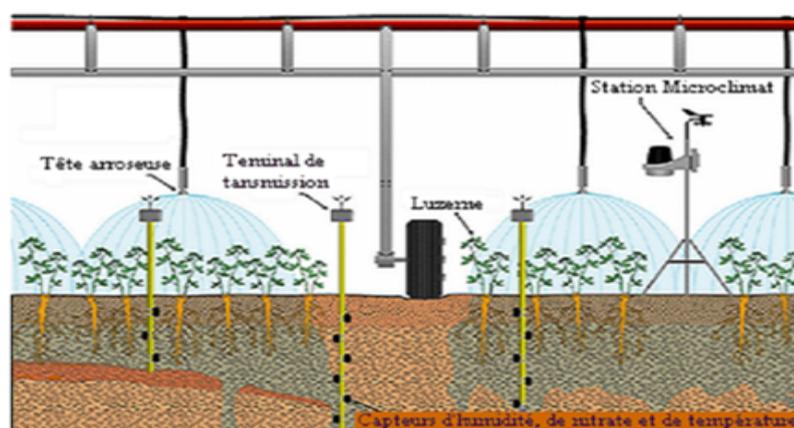


FIGURE 1.6 – Contrôle de l'irrigation d'une plantation.

3. Applications médicales

Le champ de contrôle de santé représente un grand marché pour les réseaux de capteur sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces réseaux de capteur peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain (surveillance de la glycémie, détection de cancers, le contrôle d'un cœur,..) grâce à des micros-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau [38, 10, 26]. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, le rythme cardiaque, à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Une des applications de ces réseaux est le contrôle d'un cœur qui est illustré dans la figure suivante :

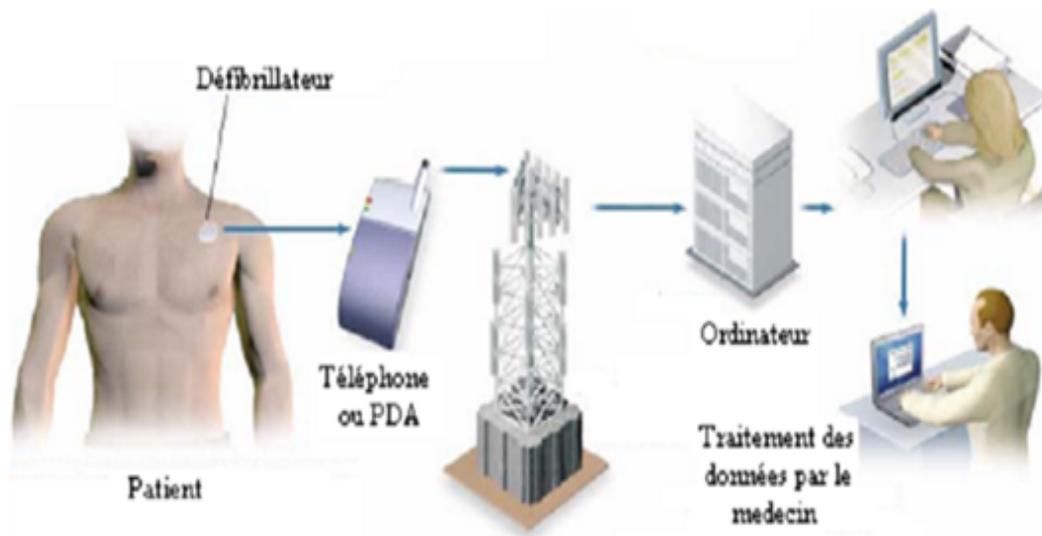


FIGURE 1.7 – Contrôle d'un cœur dans le corps humain.

4. Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs dans les processus de stockage et de livraison. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final. Grâce à ces réseaux, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service [37, 26].

5. Applications domotiques

C'est une autre classe d'applications où plusieurs concepts sont déjà conçus par les chercheurs et les architectes, comme la maison intelligente (domotique), les nœuds capteurs intelligents et actionneurs peuvent être embarqués dans des dispositifs, comme l'aspirateur, micro-onde, réfrigérateurs, et VCRs. Ces capteurs dans les dispositifs domotiques peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe par Internet ou satellite. Ils permettent à l'utilisateur final de gérer les dispositifs domestiques localement ou à distance plus facilement [9, 33].

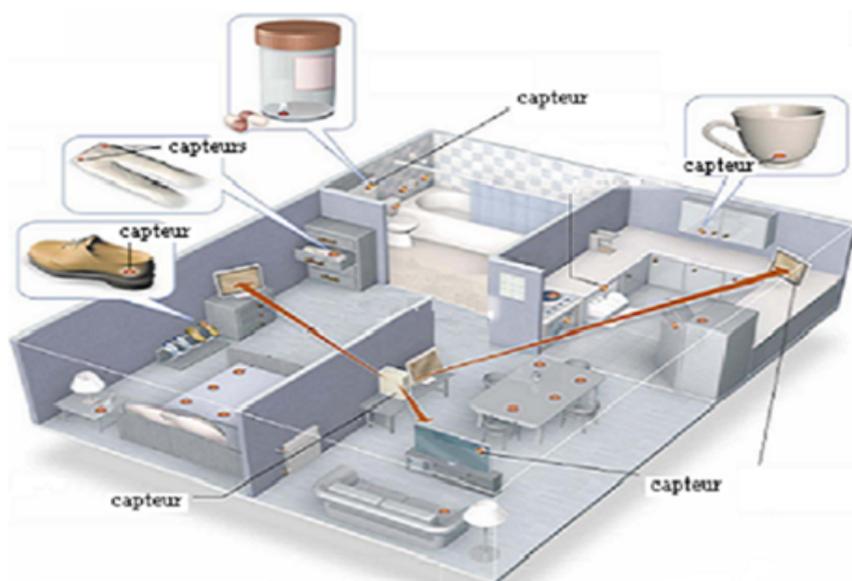


FIGURE 1.8 – Application des RCSF dans un appartement.

1.7 Conclusion

L'évolution connue récemment dans le domaine des technologies micro-électroniques et des communications sans fil a permis l'apparition d'un nouveau type de réseau classé parmi les systèmes de communication Ad hoc, ce sont les réseaux de capteurs que nous avons introduit dans ce chapitre. Nous avons défini et décrit brièvement un réseau de capteurs sans fil qui est un type particulier de réseau Ad-hoc. Nous avons décrit le capteur, ses fonctionnalités et son architecture. Nous avons cité les caractéristiques d'un réseau de capteurs et présenté quelques applications.

Aujourd'hui, les réseaux de capteurs constituent un domaine de recherche très vaste vu leurs importances. Ce domaine se porte sur le développement de nouvelles solutions pour de nombreux problèmes, en particulier celui de routage avec économie d'énergie. Le chapitre suivant se focalise sur les protocoles proposés dans la littérature pour résoudre un tel problème.

ROUTAGE DANS LES RCSFs

2.1 Introduction

Le routage d'informations dans un réseau consiste à trouver un chemin pour envoyer le message de la source vers la destination. Le principal objectif du routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau selon un certain critère de performance.

Dans les réseaux de capteurs, la conservation d'énergie, qui a une grande influence sur la durée de vie du réseau peut être considérée plus importante que les performances du réseau. Donc, les protocoles de routages doivent permettre une consommation minimale de l'énergie sans dégrader considérablement les performances du réseau [36, 24, 26].

Ce chapitre s'intéresse aux protocoles de routages dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous rappelons d'abord brièvement quelques facteurs qui influent sur la conception des protocoles de routage, puis nous présentons les classifications possibles de ces protocoles avec quelques exemples.

2.2 Facteurs de conception de protocoles de routage

Un des buts principaux lors de la conception de protocoles de routage pour les RCSFs est d'effectuer les communications tout en essayant de prolonger la durée de vie du réseau et d'empêcher la dégradation de connectivité en utilisant des techniques de gestion efficaces d'énergie. La conception des ces protocoles est influencée par certaines contraintes qui doivent être surmontées avant que la communication puisse être réalisée. Dans ce qui suit, nous récapitulons certains défis à surmonter pour la conception de protocoles de routage [44, 3, 1, 24, 27].

2.2.1 déploiement des capteurs

Le déploiement des nœuds est une considération importante, Les nœuds capteur peuvent être installés d'une manière déterministe ou aléatoire. Dans le cas du déploiement déterministe, les nœuds capteur sont placés manuellement d'une manière prédéterminée. Le routage pourrait suivre les chemins prédéterminés mais ce n'est pas toujours le cas. Quand le déploiement du réseau est aléatoire, les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller, créant ainsi une infrastructure ad hoc. Dans ce cas, si la distribution qui en résulte n'est pas uniforme, le recours à une architecture de groupe optimale s'avère nécessaire afin de permettre une meilleure connectivité, ainsi que des opérations plus efficaces en consommation d'énergie [44, 10].

2.2.2 Modèle de livraison de données

Le modèle de renvoi des données perçues constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Ce modèle peut, suivant l'application, être continu, orienté événement, orienté requête, ou hybride [56, 55] Le modèle de renvoi continu est le mieux adapté aux applications qui nécessitent de rapports périodiques sur l'environnement surveillé. Ces modèles sont bien appropriés aux applications critiques du temps. Une combinaison des modèles précédents est également possible. Le protocole de routage est fortement influencé par les modèles de données rapportées concernant la consommation d'énergie et la stabilité de route [3].

2.2.3 Hétérogénéité des nœuds/liens

Généralement, les nœuds d'un RCSF sont homogènes et disposent des mêmes capacités en terme de calcul, transmission et énergie disponible. Cependant, selon les besoins des applications, les nœuds peuvent avoir des rôles différents. Par exemple, certaines applications peuvent nécessiter des capteurs de natures différentes pour surveiller la température, la pression et l'humidité de l'environnement, détectant mouvement par l'intermédiaire de signatures acoustiques, et capturant l'image ou le cheminement visuel d'objets mobiles. Ainsi, selon la tâche assignée au capteur, les besoins en ressources de calcul, de stockage, de communication et d'énergie peuvent varier d'un nœud à un autre.

Pour remédier à ce problème, une solution envisagée par certaines applications consiste à intégrer des nœuds spéciaux plus puissants que les autres et qui seront chargés d'effectuer les tâches les plus coûteuses en termes de ressources énergétiques. Cependant, l'intégration d'un ensemble de nœuds hétérogènes dans un seul réseau impose de nouvelles contraintes liées au routage de données. Par conséquent, la conception des protocoles de routage doit prendre en compte les différents types de nœuds, et les contraintes qui en résultent [54].

2.2.4 Qualité de service

Ce point est généralement liée au temps de réponse et à la fiabilité. Dans certaines applications, la donnée doit être délivrée rapidement après sa capture, sinon elle n'est plus utile. Dans ce cas, le temps de réponse est un paramètre très important dans le protocole de routage. Cependant, dans la majorité des applications la conservation d'énergie est plus importante que la qualité des données envoyées. Dans ce cas, le protocole de routage doit accepter une certaine dégradation de la qualité des résultats afin de diminuer la consommation d'énergie pour augmenter la durée de vie du réseau [54, 19].

2.2.5 Agrégation/fusion de données

L'agrégation de données est très importante dans les réseaux de capteurs sans fils car la forte densité des capteurs engendre une grande redondance dans les données circulant à travers le réseau. Un nœud peut recevoir la même donnée captée parvenant de plusieurs voisins. La transmission des informations redondantes entraîne une consommation excessive d'énergie, C.à.d. une perte d'énergie inutile. L'agrégation de données peut être effectuée par suppression des données redondantes ou par fusion. Dans le cas de la fusion, le nœud reçoit les messages de ses voisins et les combine en un seul message selon la technique choisie. Ceci réduit considérablement le nombre de messages circulant à travers le réseau, mais engendre une latence accrue, car le nœud doit attendre les messages des voisins (expiration d'un time-out) avant d'envoyer la donnée. Lors de la conception d'un protocole de routage, il faut prévoir la ou les techniques d'agrégation et éventuellement choisir des nœuds concernés par ces opérations [57, 27].

2.2.6 Dynamacité du réseau et mobilité

Dans majorité des réseaux ils supposent que les nœuds capteurs sont stationnaires et peu d'entre elles utilisent des capteurs mobiles. Mais la mobilité des nœuds et/ou de la station de base est parfois nécessaire dans les réseaux de capteurs sans fil. C'est le cas pour des applications de type (detection/tracking) où la cible change de position d'une façon continue. Le routage dans telles applications devient très difficile, car il faut acheminer des paquets vers des nœuds mobiles. Dans ces applications, la stabilité des chemins devient un défi aussi important que la conservation d'énergie [34].

2.2.7 Consommation d'énergie

Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie, En effet, la durée de vie d'un nœud capteur a une forte dépendance avec la durée de vie de la batterie [12]. La consommation d'énergie s'effectue essentiellement au niveau de la capture, du traitement et de la transmission des données. Les études concernant les réseaux de capteurs ont montré que L'émission et la réception étant les opérations les plus coûteuses en énergie, vu que l'énergie des capteurs

n'est pas renouvelable, il est en général impossible pour un nœud quelconque de transmettre directement l'information vers la station de base. C'est la raison pour laquelle la communication dans les RCSFs est multi-sauts. Chaque nœud joue à la fois son rôle de capteur, mais également un rôle de relais dans le routage des informations vers la station de base. 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 [3, 4].

Les protocoles de routage doivent donc utiliser des mécanismes efficaces en consommation d'énergie en choisissant par exemple les chemins les moins consommateurs en énergie et en réduisant le nombre de messages de contrôle [53, 22].

2.2.8 Tolérance aux fautes

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 [58, 59, 5, 19].

2.2.9 Scalabilité

Ce point est un point influant sur la conception des réseaux. Le nombre de capteurs dans les réseaux de capteurs est souvent très grand, il est de l'ordre de centaines ou de milliers. Un protocole de routage doit fonctionner efficacement pour n'importe quel nombre de nœuds quelles que soient les conditions [54].

2.2.10 Média de transmission

Les nœuds communicants sont liés par un médium sans fil, qui doit être compatible avec l'environnement de l'application. Les capteurs possèdent le matériel nécessaire pour effectuer des communications par ondes radio. Toutefois, les problèmes classiques de la diffusion de l'information par ces moyens est difficile à cause de l'instabilité et du manque de fiabilité qu'ils présentent. De plus, l'utilisation d'un médium de communication, partagé pour faire face aux interférences radio, réduit considérablement la capacité d'exploitation du canal [54].

2.2.11 Connectivité

La connectivité des nœuds est un facteur important dans les réseaux de capteurs sans fils. Chaque nœud doit être fortement connecté pour éviter son isolation. Par conséquent, on s'attend à ce que des nœuds de capteurs soient fortement reliés. Ceci n'élimine pas le risque du partitionnement du réseau dû aux échecs des nœuds capteurs. Dans un RCSF, chaque nœud a une vue de son environnement qui est locale et généralement d'une portée limitée.

Ceci nécessite un déploiement dense des capteurs. Le déploiement et la portée des nœuds déterminent le nombre de chemins vers la station. Ils sont par conséquent des paramètres importants dans tout protocole de routage [54, 19, 22].

2.2.12 Couverture

Chaque nœud du réseaux obtient une certaine vue de l'environnement. Cette vue est limitée en terme de portée et d'énergie, elle peut seulement couvrir un domaine physique limité de l'environnement. De se fait, la couverture d'une région est également un paramètre important dans la conception d'un protocole de routage [54, 14, 15].

2.3 Consommation d'énergie dans les RCSF

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace.

L'énergie consommée par un capteur est principalement dûe aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [7, 61, 62].

2.3.1 Energie de capture

Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture [61, 4, 5].

2.3.2 Energie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel).

Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [63, 5].

2.3.3 Energie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des

données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur [63, 4].

2.4 Classification et approches des protocoles de routage pour les RCSFs

Plusieurs approches de routage ont été proposées. Récemment, Les protocoles publiés dans ce domaine ont été largement étudiés et peuvent être classifiés selon plusieurs critères. La classification la plus proposée et la plus citée qui se base sur quatre critères : la topologie (structure) du réseau, mode d'établissement des chemins. Les paradigmes de communication et selon le mode de fonctionnement du protocole. Mais les plus importants sont : la topologie (structure) du réseau, le mode de fonctionnement du protocole.

La figure ci-dessous résume ces classifications [3, 13, 60] :

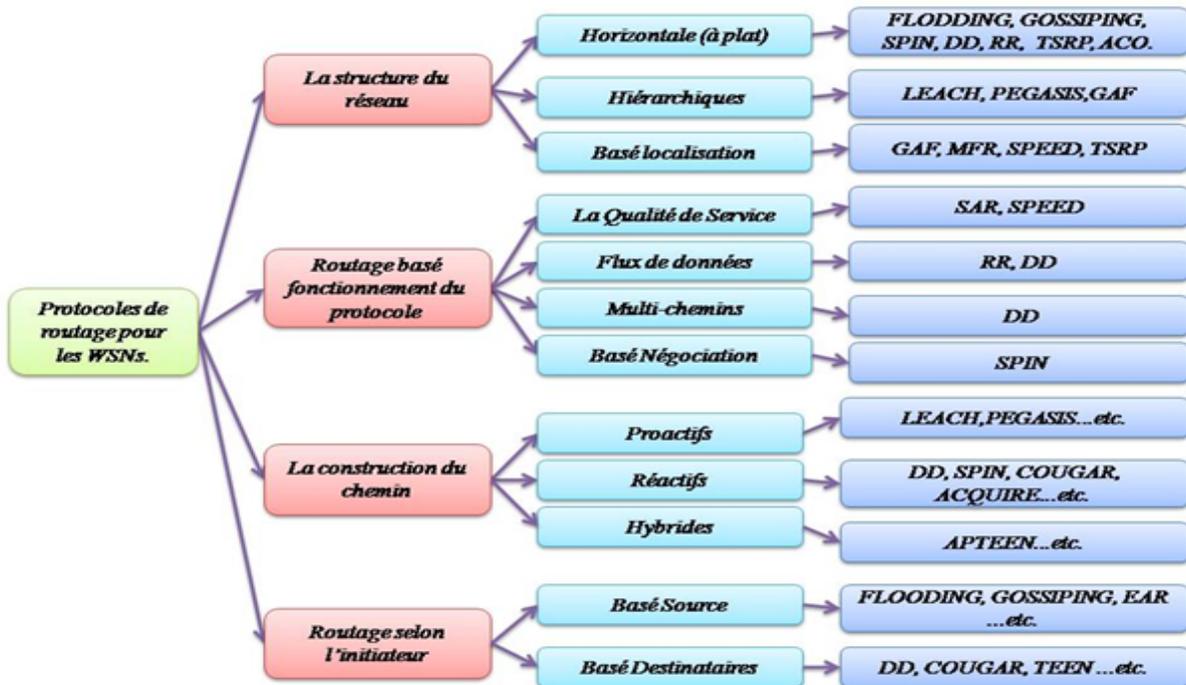


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routage [23].

2.4.1 Selon la structure du réseau

Ces protocoles sont classifiés en trois catégories : protocoles à plat (Flat based routing), protocoles hiérarchiques (Hierarchic based routing/Clustering based routing) et les protocoles basés sur la localisation géographique (Location based routing).

2.4.1.1 Les protocoles à plat

Dans les réseaux linéaires ou plats, tous les nœuds sont au même niveau et participent de la même manière au routage des données en adoptant un routage multi-sauts. Où chaque nœud joue typiquement le même rôle et collabore avec les autres nœuds afin d'accomplir les tâches de capture. Seul le nœud puits est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds capteurs.

Vu le nombre important de nœuds utilisés, il est presque infaisable d'assigner un identificateur à chaque nœud. Dans ce cas, le routage centré-données est utilisé. La station de base lance une requête vers une région et attend les données à partir des nœuds se trouvant dans la région sélectionnée.

Cette architecture est caractérisée par un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, les nœuds proches de la station de base vont participer plus que les autres aux tâches de routage. De plus, cette architecture présente une faible scalabilité due au fonctionnement identique des nœuds et d'une manière distribuée nécessitant ainsi un grand nombre de messages de contrôle.

Les protocoles suivants : FLOODING, GOSSIPING, SPIN, DIRECTED DIFFUSION (DD), RUMOR ROUTING (RR), TSRP, ACO sont des exemples de protocoles de cette approche basés sur le routage à plat [3, 20, 60].

2.4.1.2 Les protocoles hiérarchiques

Cette approche a été proposée afin de remédier aux problèmes du routage à plat, et de maintenir la conservation d'énergie au niveau des nœuds et essayer de prolonger la durée de vie du réseau en diminuant le nombre de messages transmis. Il est originalement proposé pour les réseaux filaires et ensuite utilisé pour les réseaux de capteurs. D'ailleurs, ce routage est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique et d'agrégation de données. Les protocoles selon cette approche procèdent à un partitionnement du réseau en clusters et leur associer spécialement les tâches à exécuter.

Dans le réseau les cluster-heads sont élus, soit par élection ou ils sont assignés par une autorité centralisée. Une fois que le réseau est structuré, des méthodes de communication inter et intra-clusters sont définies. Généralement, les cluster-heads sont responsables de router les données. Mais la tâche d'un cluster-head ne consiste pas seulement à router les données, mais peut être complétée par une agrégation ou une fusion de ces données. De ce

fait, des changements de rôle membre/cluster-head sont souvent appliqués pour répartir la charge du routage de données entre les nœuds du réseau. Alors le routage hiérarchique se fait principalement en deux niveaux : dans l'un les représentants des groupes (cluster-heads) sont sélectionnés, et dans l'autre le routage proprement dit est procédé.

Les protocoles suivants : LEACH, PEGASIS, GAF sont des exemples de protocoles basés sur le routage hiérarchique [3, 23].

2.4.1.3 Les protocoles basés sur la localisation géographique

Dans la localisation géographique, les informations de localisation des capteurs : positions géographiques, sont utilisées pour effectuer l'acheminement des données. Plusieurs solutions ont été proposées selon cette approche. Généralement, les méthodes employées supposent que chaque capteur a la connaissance exacte de sa position. soit grâce à la technologie GPS (Global Positioning System) avec une communication via un satellite. Ou bien, grâce à des méthodes de localisation basées sur l'estimation de la distance aux autres nœuds. Dans de telles méthodes, la localisation est assurée par une estimation de la distance séparant deux capteurs, en fonction des propriétés du signal reçu (temps de propagation, atténuation du signal, ect). Ou en fonction de l'angle d'arrivée du message.

Ce type d'approche peut présenter des inconvénients au milieu urbain, où la proximité géographique n'induit pas la proximité au sens radio c'est à dire la possibilité de communiquer. Néanmoins, couplées à des systèmes de localisation locaux, ces techniques peuvent être intéressantes.

Les protocoles suivants : GAF, MFR, SPEED, TSRP sont des exemples de protocoles basés sur le routage géographique [31, 8, 36].

2.4.2 Selon les fonctions des protocoles

Selon le fonctionnement et les avantages visés par les protocoles, on distingue : 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 les multi-chemins (Multi-path based routing), routage basé sur la négociation (Negociation based routing), et le routage basé sur les requêtes[5].

Dans cette section, les principales caractéristiques de ces différentes classes sont décrites avec une brève présentation des principes et caractéristiques des protocoles exposés comme exemples dans chaque classe.

2.4.2.1 Le routage basé sur la Qualité de Service

Ces protocoles tendent de satisfaire quelques métriques de qualité de service (QoS) par exemple : le délai d'acheminement de bout en bout, la bande passante et le taux d'erreurs.

Afin de réaliser un routage équilibré en termes de consommation d'énergie et délivrance de données en temps réel. Pour cela, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité des données.

Les protocoles suivants : SAR, SPEED sont des exemples de protocoles basés sur le routage avec QoS [2, 40, 5].

2.4.2.2 Le 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 flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux avec lequel les paquets sont produits par les différents nœuds.

Les protocoles suivants : DIRECTED DIFFUSION (DD), RUMOR ROUTING (RR) sont des protocoles basés sur le routage de flux de données dans le réseau [41, 42, 43].

2.4.2.3 Le routage basé sur les multi-chemins

Pour permettre de faire face à l'un des problèmes les plus rencontrés dans les protocoles de routage actuels. Au lieu d'utiliser un seul chemin, les protocoles maintiennent plusieurs routes afin d'augmenter les performances du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la capacité de trouver un chemin alternatif existe entre une source et une destination en cas de défaillance de chemin primaire. Ceci peut être augmenté en maintenant les chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation d'énergie et d'une génération du trafic. Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents.

Le protocole DIRECTED DIFFUSION (DD) est un exemple de protocoles basés sur le routage multi-chemins [41, 23, 44, 45].

2.4.2.4 Le routage basé sur la négociation

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. Avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux en utilisant des messages de négociation afin d'éliminer la transmission des données redondantes. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises.

La famille des protocoles "Sensor protocols for Information via Negotiation (SPIN)" sont des exemples de protocoles basés sur le principe de négociation [46, 2].

2.4.3 Selon l'établissement de route

Il ya deux manières de classifier les protocoles, dans la première, la classification se base sur l'information utilisée pour calculer les routes (routage à état de liens et routage à vecteur de distance). Dans la seconde, selon la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

2.4.3.1 Les protocoles proactifs

Le principe de base des protocoles proactifs est de maintenir à jour les tables de routage, de sorte que la meilleure route soit immédiatement connue lorsqu'une application désire envoyer un paquet à un autre mobile. La topologie du réseau peut changer ; cela signifie qu'un échange continu d'informations est nécessaire pour que chaque nœud ait une image à jour du réseau. Les tables sont donc maintenues grâce à des paquets de contrôle, et il est possible d'y trouver directement et à tout moment un chemin vers les destinations connues en fonctions de divers critères. On peut par exemple privilégier les routes comportant peu de sauts, celles qui offrent la meilleure bande passante, ou encore celles où le délai est le plus faible. L'avantage de ce type de protocole est d'avoir les routes immédiatement disponibles quand les applications en ont besoin, mais cela se fait au coût d'échanges réguliers de messages qui ne sont certainement pas tous nécessaires. Ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux de grande taille.

Les protocoles suivants : LEACH, PEGASIS...etc. sont des exemples de protocoles de cette approche basée sur le routage proactif [47, 48].

2.4.3.2 Les protocoles réactifs

Son principe est de ne rien faire tant qu'une application ne demande pas explicitement d'envoyer un paquet vers un nœud distant. Ce qui permet d'économiser la bande passante et l'énergie. Lorsqu'un paquet doit être envoyé, le protocole de routage recherche les différents chemins qui mènent à la destination. Une fois ce chemin trouvé, il est inscrit dans la table de routage et peut être utilisé. En général, cette recherche se fait par inondation (un paquet de recherche de route est transmis de proche en proche dans tout ou partie du réseau). L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle ne génère du trafic de contrôle que lorsqu'il est nécessaire selon la demande. Les principaux inconvénients sont que l'inondation est un mécanisme coûteux qui fait intervenir tous les nœuds du réseau en très peu de temps et qu'un délai est nécessaire pour l'établissement des routes.

Les protocoles suivants : DIRECTED DIFFUSION (DD), SPIN, COUGAR, ACQUIRE...etc sont des exemples de protocoles de routage réactif[47, 44, 49, 50, 51].

2.4.3.3 Les protocoles hybrides

Ce type de protocoles combine les deux approches décrites précédemment pour tirer profit de leurs avantages. De se fait, le réseau est divisé en deux zones et son principe est d'utiliser une approche proactive pour avoir des informations sur les voisins les plus proches, qui se trouvent au maximum à deux sauts d'un nœud donné. Une approche réactive est utilisée au delà de cette zone prédéfinie afin de chercher des routes.

Le protocole APTEEN est un exemple de protocole basé sur le routage hybride.

2.4.4 Selon l'initiateur de communication

La communication dans un WSN peut être lancée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

2.4.4.1 La communication lancée par les nœuds sources

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'évènements (event-driven). Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds perçoivent certains événements.

Les protocoles suivants : FLOODING, GOSSIPING, EAR ...etc. sont des protocoles de routage dont la communication est lancée par la source [44, 41, 50].

2.4.4.2 La communication lancée par les nœuds destinataires

Les protocoles où la communication est initiée par la destination utilisent les données rapportées à la suite d'une requête (query-driven). Dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud. Les communications initiées par la destination créent un grand surcoût à cause de l'inondation des requêtes dans le réseau. Ceci signifie que chaque requête aura comme conséquence une diffusion (flooding) dans le réseau.

Les protocoles suivants : DIRECT DIFFUSION (DD), COUGAR, TEEN ...etc. Sont des de protocoles de routage dont la communication est lancée par la destination [49, 45, 52, 32].

2.5 Conclusion

Les avancées récentes dans les réseaux de capteurs sans fil ont mené à de nouveaux protocoles conçus spécifiquement pour ce type de réseaux, dont la contrainte d'énergie est une considération essentielle. La conception de tel protocole de routage pour les RCSFs est influencée par plusieurs facteurs qui doivent être dépassés pour atteindre la communication efficace en termes d'énergie.

Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Chaque protocole est adapté à une situation bien précise et doit tenir compte du type de l'application, de la topologie du réseau, etc. L'objectif de la plupart des protocoles est d'optimiser la consommation d'énergie afin d'assurer une durée de vie plus longue au réseau. Cependant, certains protocoles visent à améliorer la qualité de service et à minimiser les temps de transmission.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons au cas des protocoles de routage multi-chemins adaptés minimisant la consommation d'énergie.

ETAT DE L'ART SUR LES PROTOCOLES DE ROUTAGE MULTIPATH DANS LES RCSFs

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs utilisent un très grand nombre de capteurs, possédant des ressources particulièrement limitées, pour former un réseau sans infrastructure établie [1, 64, 24]. En effet, les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées (processeur, mémoire,...), autonomes, capables de traiter des informations et de les transmettre à une autre entité (capteurs, unité de traitement...) sur une distance limitée à quelques mètres. L'énergie est une contrainte principale, elle influe directement sur la durée de vie du capteur et du réseau. Vu les contraintes en terme de ressources intrinsèques à ces types de réseaux, le routage multi-chemins peut être une alternative pour éviter la congestion des chemins les plus courts et réduire la consommation d'énergie. Dans ce chapitre, nous dressons un état de l'art sur les protocoles de routage multi-chemins qui minimisent la consommation d'énergie dans les RCSFs. Pour chaque protocole de routage, nous énumérons les avantages et les inconvénients. Ensuite viendra une comparaison entre eux, selon un ensemble de critères qui ont un impact considérable sur les performances de routage en termes de consommation d'énergie et d'optimisation du trafic.

3.2 Protocoles de routage multi-chemins à basse consommation d'énergie

Il existe une gamme importante et variée de protocoles de routage multi-chemins dans les réseaux de capteurs. Chaque protocole est basé sur des hypothèses et des conditions particulières dans le but d'exploiter ces chemins d'une manière efficace en termes d'énergie et de nombre de sauts, afin de router les données de la source vers la destination. Cette sous-section présente un sous-ensemble de cette gamme[24].

3.2.1 Directed Diffusion (DD)

Parmi les protocoles de routage multi-chemins les plus répandus dans les applications des réseaux de capteurs sans fil, nous citons Directed Diffusion [45]. La raison principale derrière l'emploi d'un tel protocole est de se débarrasser des opérations inutiles de routage de couche réseau (rediffusion inutile des paquets) afin d'économiser de l'énergie.

Son principe de fonctionnement est basé sur trois (03) phases principales : la diffusion d'intérêt, l'installation de gradients et la livraison de données.

a) Phase de la diffusion d'intérêt

La station de base diffuse des demandes qui indiquent ce que l'utilisateur a besoin, et cet intérêt est désigné par une liste de paires de « valeur-attribue » qui décrivent une tâche. L'intérêt est rediffusé périodiquement par la station de base vers ses voisins. Quand un nœud reçoit un intérêt, il vérifie s'il existe dans sa mémoire. Sinon, il l'enregistre et le rediffuse vers ses voisins. S'il existe déjà, il enregistre seulement l'identifiant du nœud source de telle façon à établir plusieurs gradients pour le même intérêt, ce qui permet le changement rapide du chemin en cas de défaillance.

b) Phase d'établissement des Gradients

Un gradient est un chemin créé dans chaque nœud qui reçoit un intérêt (chaque paire de voisins établit un gradient l'un vers l'autre). Chaque nœud établit plusieurs gradients associés à chaque intérêt stocké dans sa mémoire. Cette technique permet en premier lieu, d'établir plusieurs chemins, et en deuxième lieu, rétablir rapidement les chemins coupés en cas de défaillance de quelques nœuds voisins.

c) Phase de propagation des Données

Si un nœud détecte un événement, il le compare aux différents intérêts stockés dans sa mémoire. S'il trouve une correspondance, il envoie immédiatement le message contenant l'événement vers les voisins. Le voisin, à son tour, lorsqu'il reçoit un message de l'un de ses voisins, il consulte sa mémoire pour vérifier s'il ne l'a pas reçu précédemment et s'il y a une correspondance avec l'un des intérêts stockés. Si oui, il le stocke et renvoie le message vers le voisin suivant. Sinon, il le supprime, et ainsi de suite jusqu'à atteindre la station de base. Les nœuds stockent les messages reçus dans leurs mémoires pour une certaine période de temps pour les comparer aux messages qu'ils reçoivent ultérieurement pour ne pas les renvoyer, ainsi éviter la perte d'énergie et les boucles, et aussi pour les renvoyer en cas de perte de messages, collision, erreur de transmission ou coupure de chemin à cause de défaillance de certains nœuds

Le choix d'envoyer à travers un gradient se fait en fonction du débit de transmission fourni. Celui-ci est fixé par une procédure de renforcement du chemin.

– Renforcement de l'établissement de chemin

La station de base diffuse l'intérêt du faible débit appelé explorateur qui est prévu pour l'établissement et la préparation des chemins. Une fois qu'une source détecte un événement, elle envoie des événements explorateurs à travers des chemins multiples vers la station de base. Après avoir reçu ces événements explorateurs, la station de base renforce un voisin particulier de telle façon à avoir le chemin avec le débit le plus élevé (généralement, le voisin choisi est celui duquel le premier événement a été reçu).

Le voisin fait la même chose avec les siens, et ainsi de suite jusqu'à arriver à la source. Le renforcement d'un chemin se fait en renvoyant l'intérêt vers un voisin particulier avec un débit plus élevé que celui des intérêts explorateurs.

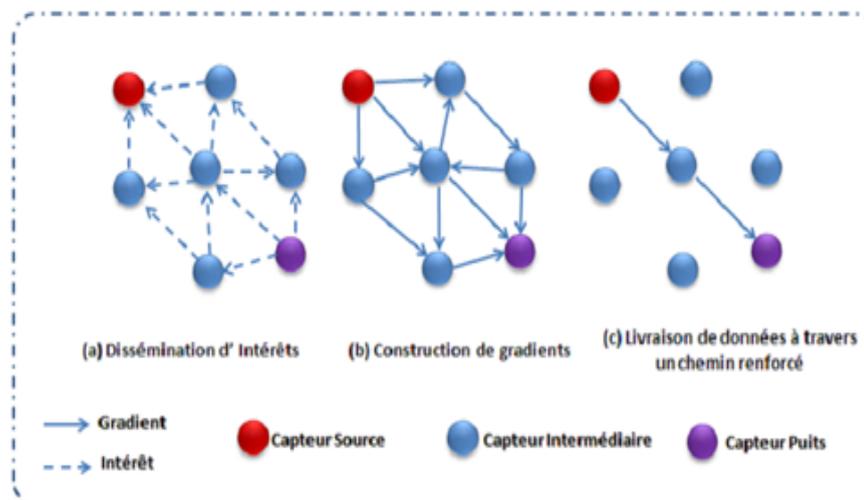


FIGURE 3.1 – Les phases du protocole Directed Diffusion [45].

- **Discussion**

Puisque ce protocole fonctionne à la demande alors il n'y a aucun besoin de maintenir la topologie globale du réseau. Les requêtes sont efficaces en consommation énergétique. Ainsi le Recouvrement de route permet la reprise de l'activité après pannes, et on trouve aussi la mémorisation qui est un grand avantage en termes d'efficacité énergétique et de retard. Cependant, ce protocole ne peut pas être appliquée à toutes les applications de réseau de capteurs puisqu'il est basé sur un modèle à base d'interrogations de délivrance de données, et la nécessité de disposer des mémoires à grande capacité pour les nœuds afin de stocker la table des intérêts, et ces intérêts sont inondés ce qui consomme de l'énergie. Et une grande perte de données ; due à la détection retardée de la panne et à son recouvrement inefficace.

3.2.2 Energie Aware Routing(EAR)

EAR [50] est un protocole de routage dans les réseaux de capteur qui utilise un ensemble de routes pour augmenter la durée de vie du réseau. Ces chemins sont choisis au moyen d'une fonction de probabilité qui dépend de la consommation d'énergie de chaque chemin. En effet, l'utilisation répétée des routes à consommation d'énergie optimale épuise rapidement l'énergie des nœuds faisant partie de ces routes. Pour cela, l'un des chemins sous-optimaux alternatifs est utilisé avec une certaine probabilité, de telle sorte que la durée de vie globale du réseau soit augmentée. EAR suppose également que les nœuds sont adressés via un adressage basé-classes qui inclut la position et le type de chaque nœud. EAR comporte trois phases principales : l'installation, la communication des données et la phase de maintenance.

1. Phase de mise en route

Une inondation localisée se produit pour trouver la route et créer une table de routage en effectuant cette phase. Chaque nœud assigne une probabilité (π) à chacun de ses voisins dans la table de routage.

2. Phase de communication de données

Chaque nœud expédie le paquet en choisissant aléatoirement un nœud de sa table de routage en utilisant les probabilités.

3. Phase de maintenance des routes

Une inondation localisée est lancée périodiquement pour mettre à jour la table des routes actives.

• **Discussion**

La comparaison d'EAR avec la diffusion dirigée a démontré qu'il procure une amélioration globale de 21% d'énergie consommée et une augmentation de 44% de la durée de vie du réseau. Cependant, une telle utilisation des routes gêne la capacité de récupération d'un nœud lors de l'échec d'une route par opposition à la diffusion dirigée. En outre, l'approche exige de recueillir l'information de localisation et d'installer un mécanisme d'adressage pour les nœuds, ce qui complique singulièrement la création d'itinéraire en comparaison avec la diffusion dirigée [50].

3.2.3 Robust and Energy-Efficient Multi-path Routing (REER)

REER [65] est un protocole multi-chemins qui sert à maximiser la durée de vie du réseau grâce à la répartition du trafic entre plusieurs chemins. Il est basé sur une méthode qui sélectionne le meilleur prochain saut pendant la phase de construction des chemins, basé sur : l'énergie résiduelle, le rapport signal sur bruit (SNR) et la taille de la mémoire tampon disponible. L'algorithme comporte trois phases principales : la phase de découverte de route, phase de maintenance des routes et la phase de transmission de données.

a) **Phase de découverte de routes**

Cette phase est comme celle de directed diffusion, la station de base commence à construire une série de chemins vers le nœud source, afin de les utiliser pour la transmission des données. Dans cette étape, chaque nœud doit acquérir des informations de ses voisins en diffusant des messages HELLO à travers le réseau. Avec cette information, les nœuds peuvent calculer la fonction du coût de liaison qui sert à choisir le meilleur saut prochain en fonction de l'équation suivante :

$$\text{Nexthop} = \max_{y \in N_x} \{ \alpha E_{resd,y} + \beta B_{buffer,y} + \gamma I_{interference,xy} \} \quad (3.1)$$

Tel que :

- \mathbf{N}_x : un ensemble comprenant tous les nœuds voisins de X.
- \mathbf{Y} : est l'un des voisins de X.
- $E_{resd,y}$: est l'énergie résiduelle de nœud y.
- $B_{buffer,y}$: représente la taille de la mémoire tampon de y.
- $I_{interference,(x,y)}$: est l'interférence entre x et y sur la base de rapport signal-sur-bruit (SNR).
- α, β, γ : sont les poids appropriés pour ces trois facteurs.

La station de base envoie la requête de route (RREQ) au nœud voisin admissible selon la fonction du coût mentionné dans le but de construire le premier chemin. Cette tendance se poursuivra par les nœuds jusqu'à ce que le nœud source soit atteint.

b) Phase de maintenance des routes

Afin de garder les chemins et les facteurs de la fonction mise à jour du coût, la source fait des inondations périodiques des messages KEEPALIVE sur les chemins pour la vérification des nœuds épuisés.

c) Phase de transmission de données

Dans cette phase, pour transmettre les données, le nœud source peut choisir l'une des méthodes de répartition de trafic suivantes.

- Le transfert de données à travers un seul trajet (REER-1)

Dans cet état, le protocole choisit le meilleur chemin parmi les chemins disponibles jusqu'à ce que le chemin atteigne un coût inférieur à un seuil déterminé. Ensuite, il passe au prochain chemin alternatif.

- Le transfert de données à travers de multiples chemins (REER-2)

Dans les applications sensibles aux délais, REER fait diviser chaque paquet à un certain nombre de segments de même taille, puis envoyer les segments à la station de base à travers les différents chemins, ce qui augmente la fiabilité de transmission des données et la résilience aux pannes.

- **Discussion**

Le REER-1 améliore la consommation d'énergie de 7% à 39% en le comparant avec la diffusion dirigée. Cependant, l'inconvénient principal de ce protocole est que la source doit inonder périodiquement le message KEEPALIVE sur les chemins pour la maintenance des routes. Cette diffusion impose une surcharge sur le réseau qui induit une consommation d'énergie inutile.

3.2.4 Micro Sensor Multi-Path Routing Protocol(MSMRP)

MSMRP[66] est un algorithme de routage multi-chemin avec économie d'énergie, qui prolonge la durée de vie du réseau en répartissant la charge de trafic sur les multiples chemins. Au moment de la construction de la route, les messages de contrôle de ce protocole peuvent se déplacer dans les régions non disponibles causées par l'indisponibilité des nœuds due à l'épuisement de leurs énergies. Cet algorithme s'exécute en 3 phases :

1) Phase de découverte de la Route

Comme le montre la figure suivante, le nœud source diffuse un message RREQ s'il a des données à transmettre, ce message sera éliminé directement, s'il est transmis à un nœud indisponible.

2) Phase de sélection de la route

Au début, la station de base peut recevoir plusieurs messages RREQ, mais elle choisit uniquement deux chemins optimaux, et envoie des messages RREP vers le nœud source. Parfois, un nœud indisponible peut apparaître sur la voie inverse. Dans ce cas, le saut précédent essaie de sélectionner un autre voisin pour envoyer le RREP au nœud source par une nouvelle voie inverse. Si le voisin n'est pas trouvé, alors il n'existe pas de route vers la source. Dans cet état, la station de base doit sélectionner un autre meilleur chemin pour envoyer à nouveau un RREP.

3) Phase de maintenance des routes

MSMRP utilise un mécanisme d'envoi du message « Hello » dans le processus RERR pour spécifier l'échec de l'itinéraire. Dans ce mécanisme, quand un nœud ne reçoit pas un message « Hello » d'un ou de plusieurs de ses voisins durant une période, il se rend compte que la route à travers voisins est expiré. Par conséquent, il prépare un message RERR et l'envoie à leur nœud de précurseur séparément. Puis il supprime également les entrées inaccessibles dans sa table de routage. Récursivement, les nœuds précurseurs font le même processus jusqu'à ce que tous les nœuds de la route soient conscients de l'expiration de l'itinéraire [66].

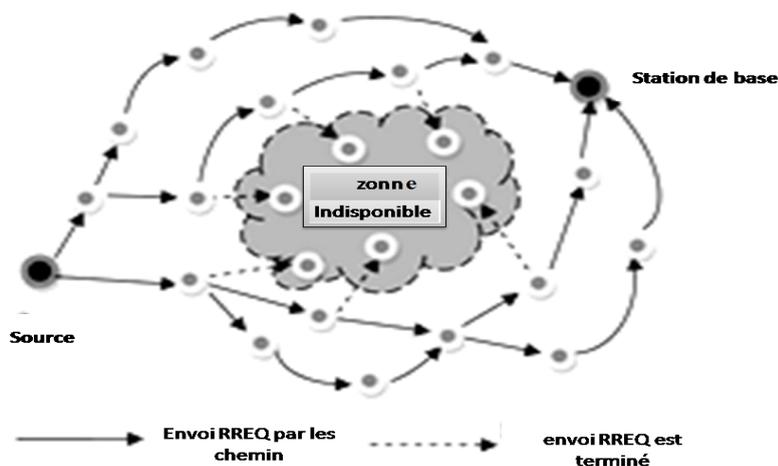


FIGURE 3.2 – La procédure de dissémination de RREQ en MSMRP [66].

• Discussion

L'algorithme MSMRP[66] pourrait réussir à construire les routes qui traversent les zones indisponibles pour la vérification des nœuds. Cependant, ce protocole a plusieurs paquets de contrôle de routage comme RREQ, RREP/RERR, message publicitaire de la table de nœud voisin, message Hello et le message supprimer le nœud voisin qui imposent des frais généraux élevés pour les nœuds de capteurs qui causent la consommation inutile d'énergie à travers le réseau.

3.2.5 Energy-Balancing Multipath Routing(EBMR)

EBMR [67] est un protocole multipath pour équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs. Son principe de fonctionnement se base sur deux phases : La construction de topologie de réseaux et la transmission des données.

a) Phase de Construction de topologie de réseaux

La station de base diffuse d'abord un paquet ND (découverte de voisins) dans le réseau. Chaque nœud recevant ce paquet fait les tâches suivantes :

1. Enregistre l'adresse du dernier saut dont il a reçu le paquet, il le conserve dans la liste des voisins par ordre croissant selon le temps de réception.
2. Quand un nœud reçoit un paquet ND, s'il a déjà reçu un, il laisse tomber le ND et ne le rediffuse pas. Sinon, il rediffuse le paquet à ses voisins.

Après l'accomplissement de la découverte des voisins, la station de base diffuse un autre paquet OR (collection de voisins) pour collecter les informations de tous les voisins de chaque nœud. Quand le nœud capteur reçoit le paquet d'OR, il répond par un paquet NCR (réponse de collection de voisins) par l'inondation. Alors la station de base a une vision sur la topologie des réseaux par l'information voisine de tous les nœuds.

b) **Phase de transmission de données**

La transmission de données suit ces étapes :

1. La station de base diffuse une requête DE (Data Enquiry) pour consulter le nœud qui a des données à transmettre.
2. Les nœuds capteurs acquittent la réponse de la requête avec un paquet DER (Data Enquiry Reply) Réponse de consultation des données.
3. Les nœuds capteurs qui ne satisfont pas la demande de renseignements, rediffusent DE.
4. La station de base calcule le chemin le plus court au nœud désiré dans le réseau.

Quand la station de base reçoit le paquet DER, elle calcule le chemin le plus court selon la quantité minimale d'énergie consommée pour transmettre un paquet, quand il y a plusieurs chemins les plus courts, nous choisissons celui qui a l'énergie restante maximale sur chaque nœud capteur.

• **Discussion**

Ce protocole assure l'équilibrage de la charge sur les chemins multiples et sur les nœuds capteurs afin de prolonger la durée de vie du réseau. Cependant, l'inondation de plusieurs paquets de contrôle de routage comme ND, OR, NCR, DE, DER, engendre une consommation inutile d'énergie à travers le réseau.

3.2.6 Improved Energy Aware and Two Hop Multipath Routing(IEATH)

Ce protocole suppose que chaque nœud connaît sa position et la quantité de son énergie restante. Pour cela, il utilise un paquet spécial qui sera envoyé périodiquement pour la mise à jour du réseau. Les nœuds emploient le mécanisme de GPS ou d'autres méthodes de détermination de leurs endroits courants avec un coût très réduit. Chaque nœud capteur envoie la quantité d'énergie restante aux nœuds voisins par les messages d'ACK. Ainsi les capteurs se rendent compte de la position et de l'énergie restante de leurs voisins pour bien router l'information [68].

Dans ce protocole, le choix de chemin se fait selon l'énergie restante de chaque nœud, en sélectionnant les nœuds ayant une énergie suffisante pour continuer le routage.

Le nœud source va suivre la méthode de tri dans l'ordre décroissant de ses voisins, en se basant sur leurs énergies restantes, puis il va envoyer les paquets en choisissant le nœud possédant l'énergie résiduelle maximale. Cependant, la priorité des chemins est attribuée selon le nombre minimal de sauts à la destination, et la sélection des nœuds est utilisée périodiquement à des intervalles spécifiques de temps à base des informations reçues par d'autres nœuds.

- **Discussion**

Ce protocole réduit le nombre de paquets de contrôle, ce qui minimise la consommation d'énergie. Cependant, il ya une possibilité de perte des paquets à cause des erreurs incontrôlables de données et la limitation de la date d'envoi des données.

3.2.7 Energy Aware Multi-Hop Multi-Path Hierarchical(EAMMH)

EAMMH [69] est un protocole de routage multipath récent, il s'exécute en deux phases : la phase d'installation et la phase de transmission des données.

A. Phase d'installation

Au début, après le déploiement des nœuds la découverte des voisins et la création des clusters, chaque nœud décidera s'il va devenir un cluster-Head pour le rond courant.

La phase d'installation fonctionne comme suit :

- **Choix de CH (Cluster Head)**

Chaque rond commence par la sélection de CH, selon le pourcentage requis du cluster et le nombre de fois qu'un nœud était sélectionné comme CH. Pour n'importe quel nœud n , l'équation de seuil pour le choix de CH est donnée comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

avec :

- P :est le pourcentage désiré du CH.
- r :est le rond courant.
- G :est l'ensemble de nœuds qui n'ont pas été CH dans les derniers ronds $1/P$.

Chaque nœud dans G choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1 et si le nombre est moins que la valeur seuil prédéfini, il sera choisi comme CH pour le rond suivant. Un nœud élu comme cluster-Head pour le tour courant envoie un message de publicité (ADV) à ses voisins à un saut pour les informer.

Pendant la formation de clusters, chaque nœud recevant le message ADV, vérifie s'il n'y a pas cette entrée et si ce saut est le plus court, alors il le rajoute comme voie de déroutement dans la table de cheminement. Par conséquent, il joindra le cluster et fait suivre le message d'ADV au reste de ses voisins.

B. Phase de transmission de données

Une fois que les clusters sont créés, les nœuds capteurs sont des créneaux horaires répartis pour envoyer les données. Les nœuds arrogés ont toujours des données à envoyer, ils les transmettent selon un intervalle de temps réparti.

Quand un nœud reçoit des données de l'un de ses voisins, il les agrège avec ses propres données. Tout en expédiant les données agrégées, il doit choisir un chemin optimal de

ses entrées de la table de cheminement.

Si aucun nœud dans la table de cheminement n'a E_{min} (seuil minimum) plus grand que le seuil d'énergie, il sélectionne le nœud ayant l'énergie minimale la plus élevée.

- **Discussion**

Ce protocole est efficace en termes d'énergie et il prolonge la durée de vie de ce réseau.

3.2.8 Sink-initiated Multipath Routing Protocol(SIMR)

La station de base collecte les données de tous les nœuds, et analyse ces données pour prendre des décisions sur l'activité dans la zone d'intérêt. Nous supposons que tous les nœuds capteurs dans le réseau possèdent un identifiant unique et sont fixes. En outre, ces nœuds capteurs ont une puissance de stockage et d'énergie limitée[72] .

Après le déploiement des nœuds, la SB envoie le message de demande de la route à tous les nœuds. Ce message contient :

- Le champ de comptage de saut (hopCount) de la valeur '0'.
- Le champ de niveau (NV) de la valeur '0'.
- Un numéro de séquence (seqno) du message diffusé.

Les premiers nœuds d'un seul saut, qui reçoivent ce message, s'identifient comme nœuds du niveau 1, c. à d, fixer leurs variable locale, $L = 1$, et l'insère à la table de routage. Si le niveau d'énergie résiduelle d'un premier nœud d'un seul saut est supérieur au seuil minimum déterminé (EnrgyTh), il incrémente de 1 le nombre de sauts et la valeur de niveau, et ajoute son ID à la chaîne des identifiants des nœuds (strNodeIDs) et retransmet le message. Les nœuds les plus loins recevant ce message, vont fixer leur niveau $L = 2$ et il répètent la même procédure.

Par la suite, chaque nœud capteur reçoit plusieurs messages de demande de diffusion d'itinéraire de ses nœuds voisins de niveau inférieur, il sélectionne un de ces voisins qui a un champ « hopCount » minimal comme son prochain nœud sur le chemin. Nous nommons celui-ci comme chemin primaire. Ensuite, le nœud extrait les champs de « strNodeIDs » dans d'autres voisins déferents de celui de primaire pour sélectionner des chemins secondaire. Ainsi, chaque nœud capteur établit sa table de cheminement, qui contient un chemin primaire le plus court saut et les chemins secondaires.

Quand une liaison est rompue à cause de la défaillance d'un nœud, le nœud qui détecte, il envoie un message d'erreur de la route vers l'arrière, de sorte que tous les nœuds ascendants puissent mettre à jour leurs table de routage, jusqu'à ce qu'un nœud source ait au moins deux voies de déroutement, il utilise les itinéraires existants. Autrement, il envoie un message de demande de construction d'itinéraire à la station de base.

- **Discussion**

Le point faible principal de ce protocole est qu'il ne considère pas la jointure de nouveaux nœuds dans le réseau.

3.2.9 QoS and energy-aware multipath routing(QEMPR)

QEMPR[70] est un protocole multi-chemins pour les applications à temps réel dans RCSFs. Les chemins multiples sont découverts par le système de la diffusion de message, tel que chaque nœud dans le réseau possède un identifiant unique, et maintient une table de voisins qui contient les informations sur les nœuds voisins (l'énergie et la gamme de transmission restantes), comme il dispose d'une possibilité de calculer la probabilité des paquets reçus et des paquets envoyés pour l'utiliser comme information de qualité de liaison.

Après la construction des chemins, le paquet est transmis à base de son numéro de séquence et le nombre de sauts entre sa source et la station de base. Cela signifie que la source va d'abord transmettre le paquet avec la valeur minimale de numéro de séquence à travers la voie avec le nombre minimal de sauts. Puis le numéro de séquence de paquet et les sauts liés au chemin seront décrementés.

Cette approche aide à distribuer le trafic de réseau dans tous les chemins multiples, de ce fait il augmente la durée de vie de réseau.

- **Discussion**

Ce protocole est utilisé pour assurer une bonne qualité de service en termes de temps. Cependant, la rediffusion périodique des messages de contrôle consomme l'énergie et réduit la durée de vie du réseau.

3.2.10 MultiPath Load-Balanced(MP-LB)

MP-LB [71] est un protocole de routage multi-chemins avec équilibrage de charge. Son idée fondamentale est que chaque nœud choisit son prochain saut selon la charge de son prochain nœud.

Ce protocole s'exécute en quatre phases : construction de la topologie, équilibrage de la charge, transmission de données et maintenance de route.

a) **Phase de construction de la topologie**

La construction de la topologie se produit après le déploiement des nœuds capteurs. Généralement, Le réseau est représenté par un graphe $G(u, v)$, un lien (u,v) appartient à E (ensemble des liens) si les nœuds u et v peuvent communiquer entre eux directement.

Le modèle de cheminement dans le réseau de capteur accorde des niveaux selon la distance du saut entre un nœud et la station de base. Un nœud appartient au niveau L , s'il est distant de L saut par rapport à la station de base, tel que la station de base

est du niveau 0. Tous les nœuds qui peuvent communiquer directement avec au moins un nœud du niveau L, mais ne peuvent pas communiquer directement avec les nœuds du niveau L-1 seront définis comme des nœuds du niveau L+1.

Enfin, chaque nœud courant calcule le nombre minimum de sauts par rapport à la station de base, et calcule ses nœuds parents et ses nœuds fils.

b) Phase d'équilibrage de charge

Cette phase vise à calculer la charge de chaque nœud capteur. L'idée principale de l'algorithme est que chaque nœud capteur envoie sa charge à la station de base. Cette dernière, calcule la charge moyenne de chaque niveau. Puis, elle annonce la moyenne de chaque niveau à tous les nœuds. En suite, chaque nœud capteur ajuste son accord de la charge moyenne et de sa charge.

Après cette phase, la station de base connaît la charge du réseau en entier et chaque nœud connaît les charges de tous les nœuds de ses parents.

C) Phase de transmission de données

Pour transmettre des données d'un nœud source vers la station de base, il y'a trois conditions à considérer :

- **Cas 1 :** Si pour chaque nœud, il existe des nœuds pères (i.e. : dans le niveau supérieur), alors, le nœud sélectionne son prochain nœud père appartenant au chemin selon la probabilité maximale de charge.

La probabilité de chaque nœud père étant choisie, est adressée par la formule suivante :

$$P_{ij} = \frac{F_{ij}}{\sum_{k \in FS} F_{ik}} \quad (3.3)$$

FS est l'ensemble des nœuds pères vivants.

- **Cas 2 :** S'il n'y a pas des nœuds dans le niveau supérieur, mais ils existent des nœuds dans le niveau inférieur (i.e : nœuds fils). Dans ce cas, si le paquet de transmission est produit par lui-même ou reçue de nœud fils, le nœud choisit aléatoirement un de ses nœuds fils en tant que prochain nœud.
- **Cas 3 :** aucun nœud père ni nœud fils. Dans ce cas, ce nœud est un nœud mort.

d) Phase de maintenance de route

Après une période, l'énergie résiduelle du nœud capteur peut devenir inégale. Pour réduire au minimum l'énergie résiduelle de chaque nœud, quand l'énergie d'un nœud diminue plus d'une valeur donnée ce nœud indiquera son énergie résiduelle à tous ses fils.

Discussion

Ce protocole a été proposé pour résoudre le problème des protocoles qui utilisent la route optimale jusqu'à l'épuisement des nœuds, mais, il engendre le problème d'inégalité dans l'énergie restante dans les nœuds après un temps donné.

3.3 Comparaison des protocoles de routage multi-chemins

Dans cette section, nous allons présenter une comparaison entre les différents protocoles de routage multi-chemins dans les réseaux de capteurs étudiés précédemment, en se basant sur un ensemble de critères, la disjonction des chemins, le choix d'un chemin, le nombre de chemins, la structure de réseaux, Qos et la mobilité.

Protocoles Critères	Disjonction des chemins	Choix du chemin	Nombre de chemins	Structure de réseau	Qos	Mobilité
DD	Disjonction partial	Station de base	Illimité	Plat	Oui	Limité
EAR	Nœuds Disjoints	Source intermediaire	Deux chemins	Plat	Non	Limité
REER	Nœuds Disjoints	Source	$K(k>2)$ Haut	Plat	Oui	Non
MSMRP	Nœuds Disjoints	Source	2	Plat	Non	Non
EBMR	Nœuds Disjoints	Station de base	$K(k>2)$ Bas	Plat	Oui	Non
IEATH	Nœuds Disjoints	Source	$K(k>2)$	Hiérarchique	Oui	Non
EAMMH	Station de base Disjoint	Source	$K(k>2)$	Hiérarchique	Non	Non
QEMPR	Nœuds Disjoints	Source	$K(k>2)$ Bas	Plat	Oui	Non
SIMR	Nœuds Disjoints	Source	$K(k>2)$	Plat	Non	Non

TABLE 3.1 – Tableau comparatif des différents protocoles étudiés [57].

D'après le tableau comparatif ci-dessus établi à partir des protocoles de routage multi-path que nous avons étudiés dans ce chapitre, on peut dire qu'il est difficile de concevoir un protocole qui supporte tous les critères. Cependant, on peut en tirer les remarques suivantes :

- La majorité de ces protocoles ne supportent pas la mobilité.
- Ces protocoles garantissent l'économie d'énergie pour le réseau.
- La plupart de ces protocoles sont des protocoles à plat.
- La grande partie de ces protocoles établit des chemins limités, l'établissement de la route est définie par la source et les nœuds sont disjoints.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une brève étude sur les différents protocoles de routage Multipath dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce routage basé sur le nombre de chemins établis. Cette étude nous a permis de mettre en évidence le fonctionnement, les points forts et les limites de ces protocoles. Une comparaison entre ces différents protocoles a été également présentée. Bien que plusieurs de ces stratégies paraissent prometteuses, il existe toujours certains défis qui persistent et nécessitent leur prise en considération par les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Nous nous intéresserons dans le reste de mémoire à la conception d'un nouveau protocole de routage multipath avec économie d'énergie pour les RCSFs, qui minimise la consommation d'énergie, et qui garantit la livraison des paquets depuis les nœuds sources vers la station de base.

NOUVEAU PROTOCOLE DE ROUTAGE MULTI-CHEMINS

4.1 Introduction

La majorité des travaux de recherche, menés actuellement dans le domaine des réseaux de capteurs, se concentrent sur le problème de conservation d'énergie. Sachant que les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries ayant une capacité limitée, l'efficacité énergétique dans le processus de routage est un facteur très important et un nouveau protocole de routage doit prendre en compte ce facteur. Ainsi, l'idéal serait d'économiser l'énergie de tous les nœuds capteurs d'une manière équitable pour qu'ils fonctionnent tous ensemble pour une longue durée.

Dans ce chapitre nous proposons un nouveau protocole de routage multi-chemins pour les RCSFs. L'objectif de ce protocole est d'augmenter la durée de vie du réseau en équilibrant l'énergie de la manière la plus équitable possible. Nous mentionnons dans un premier paragraphe les objectifs à atteindre. Puis, nous définissons les hypothèses adoptées. Ensuite, nous proposons un nouveau protocole de routage et nous détaillerons notre simulateur, à la fin nous discuterons les résultats obtenus.

4.2 Motivations

Les RCSFs ont une contrainte importante d'énergie : la batterie des capteurs est limitée pour préserver leur faible coût et leur taille réduite. Elle est également difficilement renouvelable par la nature de certaines applications qui nécessitent un déploiement aléatoire des capteurs à grande échelle et dans des zones hostiles. Les capteurs peuvent, en effet, être propulsés en grand nombre dans une zone à surveiller et doivent donc pouvoir se réorganiser pour se communiquer. Il est donc primordial que les batteries durent le plus longtemps possible. De ce fait, la conservation de l'énergie est cruciale dans un RCSF d'autant plus que le fonctionnement de tout le réseau.

L'approche de routage que nous proposons appartient à la famille des protocoles proac-

tifs où l'emplacement de tous les capteurs est précis et ils ne réagissent qu'à l'arrivée d'une requête auprès de la station de base. Cette dernière choisit leurs chemins de communications optimales vers les destinations afin d'éviter le calcul au niveau des capteurs. Cela nécessite la mise à jour périodique des informations relatives à l'énergie de chaque capteur et la topologie du réseau.

Le problème dans les protocoles de routage existant est dû au fait qu'ils utilisent les capteurs pour beaucoup de traitements et qui consomment plus d'énergie. Pour pallier à ce problème, les protocoles de routage multi-chemin qui diminuent les calculs au niveau des capteurs ont vu le jour.

4.3 Objectif

L'objectif principal de notre travail est de proposer un protocole de routage multi-chemins pour les réseaux de capteur qui permet d'équilibrer la charge sur tous les capteurs afin de conserver l'énergie et d'augmenter la durée de vie du réseau. Dans notre protocole, nous allons essayer de minimiser la consommation d'énergie le plus possible et d'améliorer l'utilisation des multiples chemins d'une manière équitable.

4.4 Hypothèses

Pour appliquer les propositions rédigées dans notre protocole nous utilisons le modèle de réseau suivant :

- Les nœuds capteurs sont tous identiques (même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement de données).
- Les nœuds sont distribués sur la zone de déploiement aléatoirement.
- 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.
- Les capteurs sont fixes, leurs positions sont précises et uniques, et la contrainte de mobilité sur les capteurs n'est pas prise en compte.

4.5 Fonctionnement du protocole

Afin de conserver l'énergie des nœuds capteurs, l'idée de base de notre protocole est de rendre la station de base (SB) responsable de tous les calculs des nœuds capteurs, et ces derniers ne font que l'émission et la réception des données ce qui réduit leur consommation énergétique.

Initialement, la SB collecte toutes les informations sur les nœuds afin de découvrir la topologie du réseau, puis elle exploite les positions de tous les voisins situés entre le nœud source et la SB pour calculer les chemins existants vers la source de données. Finalement, elle calcule la route optimale qui assure un minimum de consommation énergétique et garantit la livraison des données.

Notre protocole s'exécute en deux phases, la phase de découverte de la topologie et la phase de communication de données.

Dans la première phase, la SB cherche à découvrir la topologie du réseau à partir des informations collectées, tandis que la deuxième phase sert à choisir la route optimale pour transmettre les données vers la SB, et mettre à jour les informations dans sa table de routage pour sélectionner un autre chemin optimal.

4.5.1 Phase de découverte de la topologie

Après le déploiement des nœuds dans le réseau, la SB diffuse un message « NEIDET » à ses voisins et chaque nœud recevant ce message le rediffuse aux autres voisins qui l'ont pas reçu, jusqu'à ce qu'il informe tous les nœuds du réseau.

Ce message « NEIDET » est envoyé pour informer et demander à chaque nœud de créer son propre paquet qui va contenir les informations suivantes :

1. ID : Identifiant du capteur.
2. ER : Énergie résiduelle.
3. IDS : Identifiants de ses voisins.
4. $D(i, j)$: Distance entre lui et ses voisins.

Et pour sa création le nœud capteur va en mettre son unique identifiant, et son énergie initiale qui sera calculée à chaque consommation par la SB, en utilisant le modèle énergétique de Heinzelman et al [62], et les identifiant de ses voisins lors de la diffusion de message « NEIDET » selon la portée d'un nœud, et la distance entre les voisins est estimée selon la force de signal, en utilisant le mécanisme RSSI.

Après la création de tous les paquets, les nœuds les envoient à la SB, et après avoir été récoltée par la SB, cette dernière va créer une table de routage qui contient toutes les informations de réseau d'où va découvrir la topologie de réseau.

Exemple :

Nœud	ID	ER	IDs	D (i, j)
1 ^{er} nud	1	4/5	2	20
			4	25
2 ^{me} nud	2	3/5	4	15
			6	20

TABLE 4.1 – Exemple de table de routage.

Les voisins qui se trouvent entre chaque nœud et la SB seront déterminés suivant la métrique de distance suivante :

$$d(i, j) \leq R_i. \quad (4.1)$$

Et

$$d(i, SB) \leq \sqrt{d(i, j)^2 + d(j, SB)^2}. \quad (4.2)$$

Tel que :

SB : Représente la station de base.

R_i : Représente la portée d'un nœud i.

D(i, j) : Représente la distance entre le nœud i et le nœud j.

D(i, SB) : Représente la distance entre le nœud i et la station de base SB.

Après avoir créé la table de routage et reçu toutes les informations concernant les nœuds capteurs, la station de base peut avoir une vue globale sur la topologie de réseau.

4.5.2 Phase de communication des données

Après la découverte de la topologie du réseau, la SB cherche la manière d'échanger les informations avec la source, et cette dernière se fait par deux étapes : la première étape sert à découvrir une route optimale pour transmettre les données ; et la deuxième étape sert à transmettre des données captées par la source vers la SB, et une mise à jour faite après chaque transformation dans le réseau.

1. Étape de découverte de la route optimale

Dans cette étape, la SB s'occupe de trois tâches essentielles suivantes :

a. Calcul des routes existantes

Après que la table de routage est créée et la topologie du réseau est découverte ; la SB cherche les routes existantes vers la source de données suivant l'algorithme illustré ci-dessus :

• Principe de notre algorithme

L'algorithme sélectionne les nœuds qui forment le chemin en commençant par le nœud source jusqu'à la SB. Et pour chaque nœud dans le réseau on sélectionne ses voisins par rapport à la SB, on attribue un compteur qui décrémente le nombre de voisins sélectionnés et on sauvegarde la route parcourue, cette sauvegarde est faite pour résoudre le problème des nœuds en communs, pour pouvoir désigner d'autres chemins créés par ce genre de nœud. Initialement, la SB commence par le nœud source, elle sélectionne l'un de ses voisins et décrémente le compteur, chaque voisin sélectionné sera rajouté au chemin i , et continue la sélection jusqu'à atteindre la SB. Si la SB est atteinte alors le chemin i est désigné.

Après que le chemin i est déterminé, on cherche à trouver d'autres routes existantes. En effet ; la SB revient vers le nœud source suivant le chemin i pour chercher un nœud qui contient un compteur diffère de Zéro. S'il existe, on désigne un autre chemin à partir de ce nœud en comptant le chemin sauvegardé parcouru et on continue comme le scénario initial. Et lorsque les compteurs de tous les nœuds atteignent zéros alors toutes les routes entre la SB et la source de données sont déterminées.

Lorsque tous les chemins sont déterminés, la SB calcule le nombre de sauts pour chaque chemin NS_i . Puis elle calcule les coûts de chaque chemin, tel que le coût d'un chemin est la somme des coûts ou bien d'énergie restante de tous ses nœuds : ER_i .

Le pseudocode suivant représente le fonctionnement de l'algorithme :

Algorithm 1 Recherche_chemin(nœud_courant)

```
n : Entier ; // Nombre de voisins
chemin : pile ; // Liste des nœuds parcouru
Debut
si ( $n == 0$ ) et ( $nud\_courant == "source"$ ) alors
    Ecrire ("fin");
sinon
    si ( $nud\_courant == "StationdeBase"$ ) alors
        sélectionner le chemin (chemin trouvé);
        ajouter à la liste des chemins trouvés;
        empiler(chemin);
        recherche_chemin(nœud_précédent);
    sinon
        si ( $n == 0$ ) alors
            il n'y a pas de chemin a suivre, revenir au précédent;
            dépiler(chemin);
            recherche_chemin(nœud_précédent);
        sinon
             $n = n - 1$ ;
            recherche nœud suivant selon le n;
            empiler(nœud_suivant);
            recherche_chemin(nœud_suivant);
        finsi
    finsi
finsi
Fin
```

b. Calcul de la route optimale

Pour choisir la route optimale, qui sera utilisée pour la transmission des données de la source vers la SB, selon les deux critères suivants : l'énergie résiduelle et le nombre de sauts. Nous proposons trois méthodes différentes ; tel que la première méthode sert à utiliser un seuil minimal qui protège les noeuds. La deuxième méthode, c'est une formule mathématique qui calcule à chaque fois la route optimale, Par contre, la troisième méthode combine entre les deux premières méthodes qui utilise un seuil qui protège les noeuds et une formule mathématique.

• Première méthode

La première méthode proposée est la plus efficace en terme d'équilibrage de charge sur les chemins du réseau, tel que son idée principale est de désigner un seuil, initialement égal à l'énergie initiale d'un capteur, puis il se décrémente d'un cart(1/4) d'énergie totale jusqu'à atteindre un seuil minimal, qui sert à protéger les noeuds les plus faibles de ne pas épuiser subitement.

Initialement, la SB calcule le nombre de sauts (NS_i) et la longueur (D_i) de chaque chemin, puis elle désigne les noeuds les plus faibles dans le réseau c-à-d pour chaque chemin elle désigne le noeud le plus faible à chaque mise à jour dans sa table de routage, après elle se base sur ces noeuds pour représenter les coûts des chemins.

- Principe de l'algorithme

La SB commence à décrémente le seuil initial (variant) tour après tour, et s'il ya des routes qui non pas atteignent ce seuil par apport à leurs noeuds les plus faibles, alors la SB choisit la route ayant le nombre de sauts plus élevé et la distance plus courte c-à-d. le chemin ayant le nombre NS_i/D_i maximal. Et si toutes les routes atteignent ce seuil, alors ce dernier sera décrémente et le passage à la prochaine tour. Et le scénario continu jusqu'à ce que le seuil sera minimal c-à-d. le dernier tour, et toutes les routes atteignent ce seuil c-à-d. tous les chemins possèdent au moins un noeud qui atteint ou bien dépasse le seuil minimal désigné, alors le chemin qui possède le bon noeud parmi les noeuds les plus faibles sera choisi comme chemin optimal.

Algorithm 2 Choisir_chemin()

```

Seuil=energie_initial-10%; // décrementation de 10%
SM=EMP; // SM :Seuil minimal , EMP : energie minimal pour protéger les nœuds.
Tour=1;
V[]=vrai; Max=0;
FUN :entier;
NS[i] :tableau d'entier;
NSi :nombre de sauts, Di :la distance du chemin
Mini; //le nœud ayant le minimum d'énergie dans le chemin i.
Debut
tantque (Seuil > SM) faire
  si (V[i] == vrai) alors
    pour ((i = 1); (i < nbchemin); i++) faire
      j←0;
      tantque (j <= longueur_chemin) faire
        si (ERj <= Mini) alors
          Mini← ERj;
        finsi
      j ← j+1;
    fin tantque
    si (Mini <= Seuil) alors
      V[i]← faux; suspendre (chemin[i]);
    finsi
    Fun ← NSi/Di;
  si (FUN > max) alors
    Max ← FUN; idmax ← i;
fin pour
Return idmax;
  sinon
    Tour ← Tour+1;
    Seuil ← Seuil-(10% de energie_minimal);
    libérer tout les chemins suspendus;
  finsi
fin tantque
pour (i = 1); (i < nbchemin); i++ faire
  si Mini >= Max alors
    Max(Mini); Max← Mini; idmax← i;
  finsi
fin pour
Return idmax;
Fin.

```

• **Deuxième méthode**

Dans cette méthode nous avons proposé une formule mathématique qui calcule à chaque fois la route optimale pour la transmission des données de la source vers la SB, et sa création suit le résonnement suivant :

- NS_i : le nombre de sauts de chemin i entre la SB et la source, qui sera calculé par la SB pour chaque chemin.
- D_i : la distance entre la SB et la source par le chemin i ou bien la longueur de cette route qui est la somme des distances des ses sauts.
- ER_i : Energie Résiduelle de chemin i , qui est calculée par la SB pour chaque chemin, et ER_i égal à la somme des énergies résiduelles des nœuds de chemin i
- $ERNF_i$: Energie Résiduelle de nœud le plus faible ou bien le nœud le plus bat énergétiquement sur le chemin i , est sera désigné par la SB.

Puis nous avons défini une première formule F1 suivant les deux premières variables NS_i et D_i , qui nous cherche le chemin le plus court avec un nombre de sauts plus élevé, et pour déterminer cette route nous avons besoin de chercher celle qui a NS augmente et D diminue c.à.d.la valeur NS/D maximal. Alors La 1erformule est comme suit :

$$F1 = NS_i/D_i \quad (4.3)$$

(Cette formule sert à chercher un chemin qui possède beaucoup de sauts et moins de distance).

Puis, nous avons défini une deuxième formule F2 qui utilise les deux dernières variables ER_i et $ERNF_i$: Et cette formule sert à comparer l'énergie résiduelle des chemins et l'énergie résiduelle des nœuds les plus faibles, tel que nous avons besoins de chercher le chemin ayant énergie résiduelle augmente et celle des nœuds les faibles par apport aus autres aussi, c.-à.-d. cette formule cherche le chemin ayant la valeur maximale pour le produit des deux énergies comme elle est montrés dans la deuxième formule F2 suivante :

$$F2 = ER_i * (ERNF_i/\sum ERNF_{j-i}) \quad (4.4)$$

Finalement, une formule générale F, qui combine les deux formules et qui sert à combiner les deux objectifs, est défini comme suit :

$$F_i = F1 * F2 = (NS_i/D * ER_i) * (ERNF_i/\sum ERNF_{j-i}) \quad (4.5)$$

Et pour chercher le chemin optimal, on calcule la valeur maximale de F_i :

$$CH_OP = max(F_i) \quad (4.6)$$

• **Troisième méthode**

Cette méthode combine les deux premières méthodes, tel qu'elle utilise le seuil énergétique qui sert à protéger les nœuds capteurs avec une formule mathématique suivant :

$$F_i = \frac{NS_i + (ERNF_i * NST)}{2} \quad (4.7)$$

Tel que :

- NS_i : le nombre de sauts de chemin i.
- $ERNF_i$: Energie résiduelle d'un nœud le plus faible de chemin i.
- **NST** : le nombre de sauts total de tout le réseau.

Cette formule cherche la moyenne entre le nombre de sauts de chemin i, avec l'énergie résiduelle de son nœud le plus faible multiplié par le nombre de sauts total.

Le principe de cette méthode : initialement, notre protocole vérifie s'il y a des routes qui n'ont pas atteint le seuil ou bien qui n'ont pas des nœuds à protéger alors le chemin optimal qui sera l'une de ces routes est la route qui maximise la formule ci-dessus :

$$CH_OP = \max(F_i). \quad (4.8)$$

Si toutes les routes possèdent des nœuds à protéger, alors la route optimale c'est celle ayant le bon nœud parmi les nœuds les plus faibles.

c) Informer la source sur la route optimale choisie

Lorsque la route optimale est déterminée alors la SB envoie un message au nœud source pour l'informer sur cette route à utiliser pour la transmission des données, et cela se fait à chaque mise à jour ou bien à chaque autre choix.

2. Étape de transmission de données

Dans la deuxième étape, après que la source est informée sur la route optimale choisie et lorsque cette dernière capte des données à envoyer, elle va utiliser cette route déterminée pour faire la transmission de ces données captées vers la SB. Et à chaque fois que la route optimale est utilisée ou bien la transmission des données est faite, la SB va faire une mise à jour de sa table de routage selon l'état énergétique des nœuds et calcule une autre route optimale à utiliser pour la prochaine transmission.

4.6 Evaluation des performances

Dans son sens le plus général, la simulation est une technique de modélisation du monde réel. Elle consiste à modéliser un système en représentant toutes ses entités, leurs comportements et leurs interactions.

Dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, la simulation est une étape incontournable lorsqu'on veut tester et évaluer des modèles d'application ou des protocoles de communication. L'expérimentation réelle s'avère quelques fois très coûteuse. De plus, la simulation offre un gain considérable en temps, une flexibilité en permettant la variation des paramètres et une meilleure visualisation des résultats sous forme de graphes faciles à analyser et interpréter.

Nous distinguons plusieurs modèles de simulation selon qu'ils soient déterministes ou aléatoires, continus ou discrets. Pour expérimenter la solution proposée, nous avons choisi d'utiliser un outil de simulation que nous avons créé avec java. Cette décision a été prise après l'étude des simulateurs de RCSFs existants (NS-2, J-Sim, OMNet++, Glomosim, SENSE, TOSSIM, BOIDS et Shawn), qui étaient pour la plupart beaucoup trop lourds, difficiles à maîtriser dans des délais aussi courts et qui sont peu adaptés à nos besoins [72].

4.6.1 Les simulateurs des RCSFs Actuellement disponibles

- **NS2** : C'est un simulateur développé à Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) . Il est conçu principalement pour le monde de l'Internet. Il permet de simuler le comportement des protocoles standard de l'Internet tels que TCP, IP et permet d'étendre le simulateur aux nouveaux protocoles de l'Internet (routage, transport, application) et aux nouvelles architectures.
- **OPNET** : OPNET (Optimised Network Engineering Tool) [OT] est un simulateur à événements discrets. C'est un outil très puissant dédié à l'étude des réseaux de télécommunications. Au niveau architectural, OPNET se décompose en trois parties : la partie modélisation, la partie tests et la partie évaluation chargée de l'analyse des résultats.
- **OMNeT++** : OMNeT++ (Objective Modular Network Test-bet in C++) [Sys] est un environnement de simulation des événements discrets. Il est essentiellement utilisé pour la simulation des communications réseaux, mais grâce à son architecture générique et flexible, il est utilisé avec succès dans plusieurs autres champs tels que : la simulation de systèmes complexes de traitement et de communications de données, les réseaux de files d'attente, la modélisation des multiprocesseurs et d'autres systèmes hardware distribués, la validation des architectures hardware, etc.
- **GloMoSim** : GloMoSim (Global Mobile Simulator) [Lib] est un environnement de simulation à grande échelle pour les réseaux sans fil et filaires qui à été développé à UCLA (University of California, Los Angeles). Il a été conçu en utilisant la capacité de la simulation parallèle fournie par PARSEC (PARallel Simulation Environment for

Complex systems) qui est une extension du langage C.

- **TOSSIM** : TOSSIM [LL] est un simulateur d'évènements discrets pour les réseaux de capteurs utilisant le système TinyOS (l'OS le plus utilisé pour les RCSFs). Au lieu de compiler l'application directement dans le capteur, l'utilisateur peut le faire dans la framework TOSSIM qui s'exécute sur un PC.
- **JSim** : J-Sim [pag, SCH+06, Tya02] est un logiciel utilisé pour simuler le comportement des processus pseudo-parallèles, programmé en Java. J-Sim repose sur une structure logicielle basée sur des composants, appelée " Autonomous Component Architecture" (ACA). Le code source est organisé en paquetages relatifs à un type de composants. Un composant est une entité indépendante représentant un objet physique (une batterie, un module radio, une couche logicielle, etc.) ou logique (un protocole de routage, un modèle de mobilité, etc.). Ces composants seront ensuite connectés à l'aide de ports afin de générer un réseau simulé.

Le choix de JAVA

Java est un langage de programmation orienté objet qui permet de développer des objets génériques de façon que le code puisse être réutilisable. Cette caractéristique nous a permis de développer des classes indépendamment du programme principal.

Notre choix pour ce langage est motivé par les critères suivants :

1. Java nous a permis la programmation modulaire.
2. Java est un langage indépendant de toute plate-forme d'exécution, ce qui signifie qu'un même programme peut fonctionner sur différentes plates-formes et sous différents systèmes d'exploitation. C'est l'un des principaux atouts de Java par rapport à d'autres langages de programmation.
3. Java est doté d'une bibliothèque de classes très riche :

Le graphisme : cette bibliothèque est exploitée dans le développement des interfaces graphique (fenêtres et interactivité) relatives à son fonctionnement.

La programmation concurrente (multithreading) : cet avantage nous a permis de synchroniser les différentes communications entre les composants de notre application lors du lancement de plusieurs processus au même temps tel que les capteurs et la station de base qui sont implémentés sous forme de thread.

Gestion des fichiers : nous avons utilisé les fichiers textuels comme un moyen de communication entre les différents capteurs et la station de base. Chaque entité dans le réseau possède un fichier qui représente un template de réception. L'envoi d'un message à un capteur donné est simulé par une écriture sur le fichier de ce dernier en prédisant l'identité de l'expéditeur.

Gestion des exceptions : c'est un mécanisme utile auquel nous avons fait appel pour gérer les erreurs inattendues lors de l'exécution de notre application.

L'utilisation de ses bibliothèques facilite grandement la tâche du programmeur lors de la construction des applications complexes. Pour la programmation, nous avons utilisé l'environnement de développement JDK (Java Development Kit). JDK est un environnement dans lequel le code Java est compilé pour être transformé en pseudo-code afin que la machine virtuelle de Java JVM (Java Virtual Machine) puisse l'interpréter. Il regroupe l'ensemble des composants permettant le développement et l'exécution des programmes Java.

4.6.2 Modèle énergétique

Le modèle énergétique utilisé dans notre protocole est celui de Heinzelman [20]. Dans ce modèle la consommation énergétique concerne principalement les transmissions et les réceptions. Heinzelman et al proposent un modèle radio de consommation d'énergie (figure 1). ainsi les énergies nécessaires pour émettre $E_{TX}(l, d)$ et recevoir $E_{RX}(l)$ des messages sont données par :

Pour émettre un message de l bits vers un récepteur de d mètres :

$$E_{TX}(l, d) = l * E_{elec} + l * E_{amp} * d^2 \quad (4.9)$$

Pour recevoir un message de l bits :

$$E_{RX}(l, d) = l * E_{elec} \quad (4.10)$$

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).

L : 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.

4.6.3 Paramètres de simulation

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

Ces capteurs sont déployés à l'intérieur d'un carré de taille 100 par 100 créant ainsi une topologie contenant 100 à 500 capteurs. La position des nœuds dans la topologie générée est réalisée d'une manière aléatoire. Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés :

Paramètre	Valeur
Nombre de nœud	20 à 50
Nombre de stations de base	1
Nombre de sources (nœud cible)	1
Surface de simulation	100 * 100 m
Porté de transmission	30 m
énergie initiale	5000 N Joule

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation.

4.6.4 Les métriques d'évaluation

Pour évaluer l'efficacité énergétique et la garantie de livraison de notre protocole, nous avons choisi le protocole MEERP[74] comme protocole de comparaison. Ce choix est justifié par le fait que le protocole MEERP[74] est considéré comme protocole récent par rapport à les autres protocoles de routage multipath qui garantissent la livraison des paquets entre la source et la destination. La comparaison de notre protocole avec ce protocole portera sur les métriques suivantes :

- **Consommation d'énergie**

Le but principal de notre protocole est de minimiser la consommation d'énergie des nœuds, afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Pour cela, nous allons comparer notre protocole avec le protocole MEERP[74] en prenant comme critère, l'énergie moyenne consommée (EM) par tous les nœuds dans le réseau.

$$EM = \frac{\sum_{i=0}^n (E_i - ER_i)}{n} \quad (4.11)$$

Où : E_i est l'énergie initiale du nœud i .
 ER_i : est l'énergie résiduelle du nœud i .
 n : est le nombre de nœuds dans le réseau.

- **Taux de succès**

Le taux de succès représente le rapport entre le nombre de paquets reçus par la station de base et le nombre total de paquets envoyés par tous les nœuds dans le réseau.

$$Taux_succs = \frac{nbr_paquets_reus_SB}{nbr_total_paquets_envoys} \quad (4.12)$$

Un protocole de routage pour les réseaux de capteurs doit minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis un nœud capteur vers la station de base, car l'information transportée peut être très importante.

- **Durée de vie du réseau**

Pour mesurer la durée de vie du réseau, nous avons, dans un premier temps, défini la durée de vie d'un RCSF comme étant la durée écoulée depuis le déploiement du réseau jusqu'à ce que le dernier nœud meurt. Ensuite, nous avons défini la durée de vie d'un RCSF comme étant la durée écoulée depuis le déploiement du réseau jusqu'à ce que le premier nœud meurt.

- **La latence moyenne**

La latence est le temps nécessaire à un paquet pour qu'il soit acheminé à partir du nœud source jusqu'à la station de base. Donc, la latence moyenne est la somme des latences de tous les paquets divisée par le nombre total des paquets reçus.

$$La_latence_moyenne = \frac{\sum_{i=0}^n (temps_reception_i - temps_emission_i)}{a} \quad (4.13)$$

Où :

a : est le nombre de paquets reçus par la station de base.

4.6.5 Discussion des résultats

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de la simulation obtenus suivant les métriques de performance discutées précédemment. Le résultat de chaque scénario est la moyenne de l'exécution de sept simulations indépendantes.

– Consommation d'énergie

Les résultats de la simulation présentés sur les figures montrent que le notre protocole améliore considérablement la consommation moyenne d'énergie dans le réseau par rapport au protocole MEERP[74]. Cette amélioration peut être justifiée par le mécanisme appliqué par notre protocole qui essaye d'acheminer le paquet via le chemin optimal en termes de consommation d'énergie.

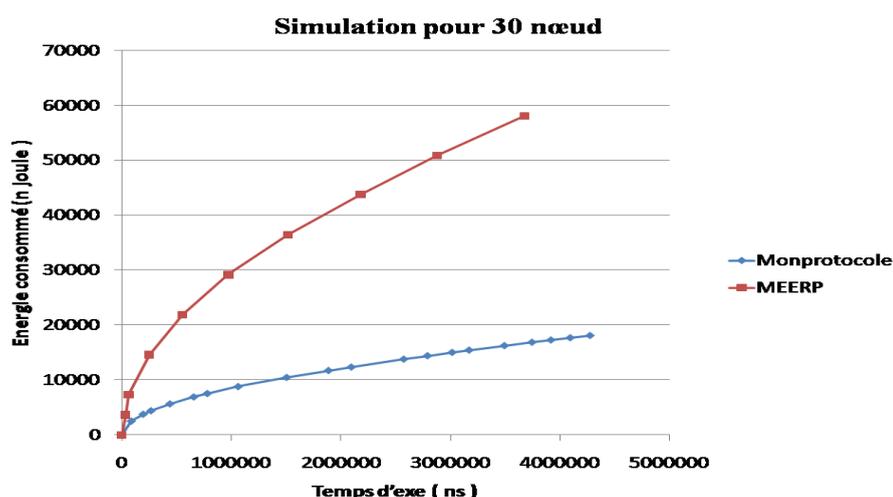


FIGURE 4.1 – consommation d'énergie en terme du temps.

Après plusieurs essais nous remarquons que le nombre de nœuds dans le réseau augmente l'énergie moyenne consommée pour les deux protocoles. Ceci se justifie par le nombre de messages de contrôle et de maintenance qui circulent dans le réseau, ce qui augmente l'énergie moyenne consommée.

On peut constater qu'avec MEERP[74], les nœuds épuisent leurs énergies plus rapidement qu'avec notre protocole.

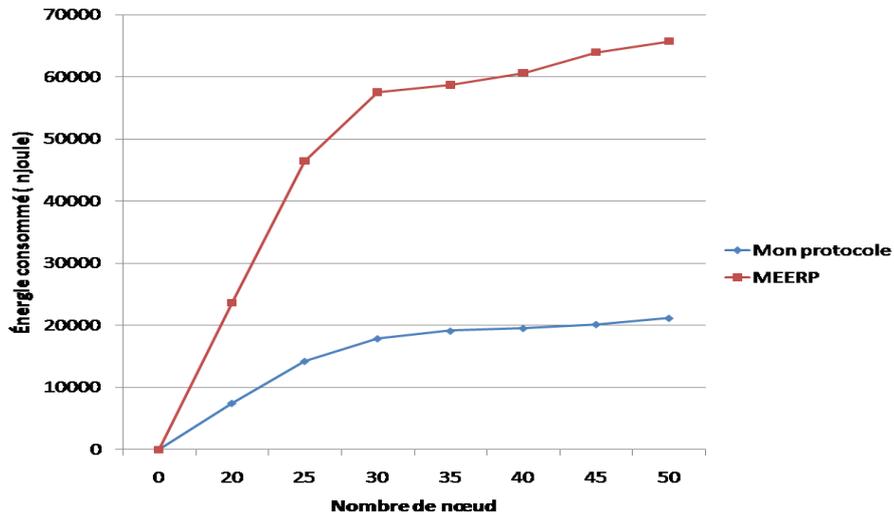


FIGURE 4.2 – Consommation d’énergie en terme du nombre de nœuds.

– **Taux de succès**

On remarquer que le nombre de nœuds dans le réseau influe sur le taux de succès ; en effet, plus le nombre de nœuds dans le réseau est élevé plus le taux de succès est meilleur.

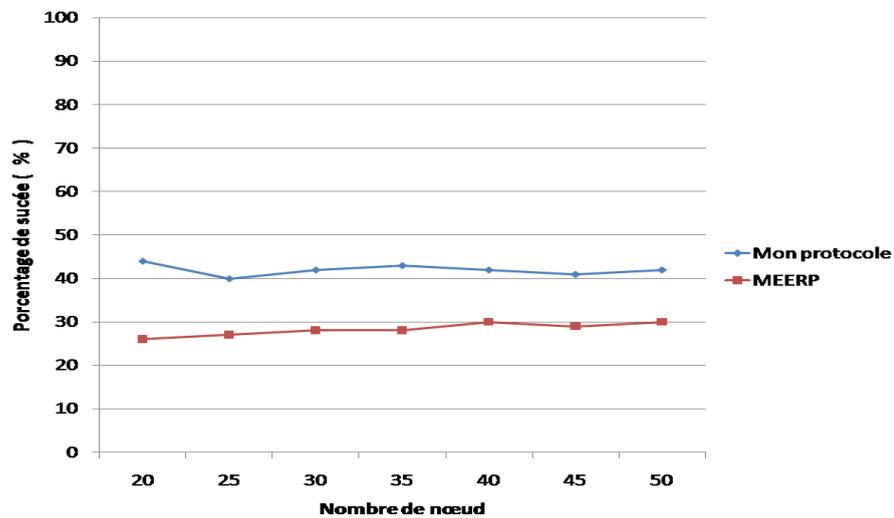


FIGURE 4.3 – Taux du succès par rapport au nombre de nœuds t.

On peut aussi remarquer que notre protocole présente un grand avantage par rapport au protocole MEERP[74].

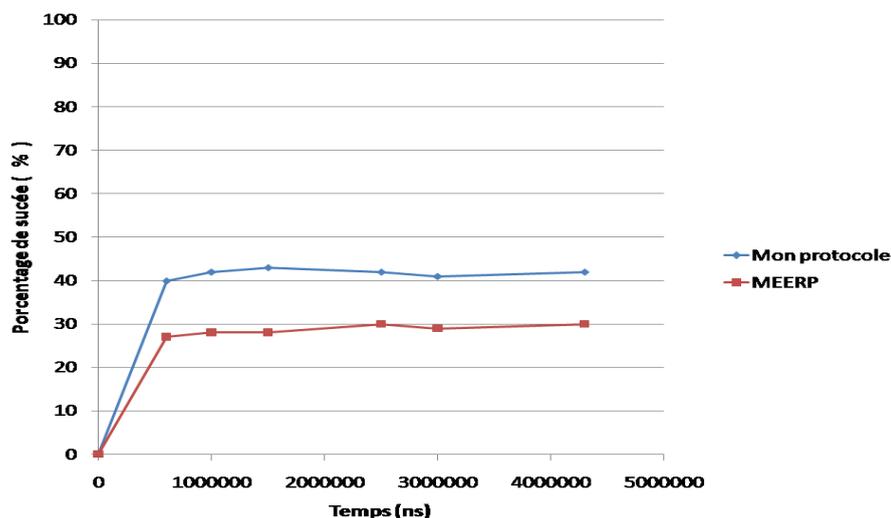


FIGURE 4.4 – Taux du succès par rapport au temps de simulation.

– Durée de vie du réseau

On peut constater que le nombre de nœuds dans le réseau influe sur la durée de vie du réseau. Et ça revient au nombre de messages de contrôle et de maintenance qui sont émis périodiquement par chaque nœud dans le réseau pour la mise à jour des tables de voisins. Plus il y a de nœuds dans le réseau plus il y a de messages de contrôle circulant dans le réseau, ce qui augmente la consommation d'énergie dans le réseau entier et ainsi réduit la durée de vie du réseau. Cependant, on peut remarquer que notre nouveau protocole surperforme le protocole MEERP[74]. et augmente la durée de vie du réseau en minimisant le nombre de message de controles, et ceci revient au mécanisme de sélection de chemin qui essaye de favoriser le nœud qui a une grande énergie résiduelle lors du calcul de plus performant chemin et que la station de base gère tout le réseau.

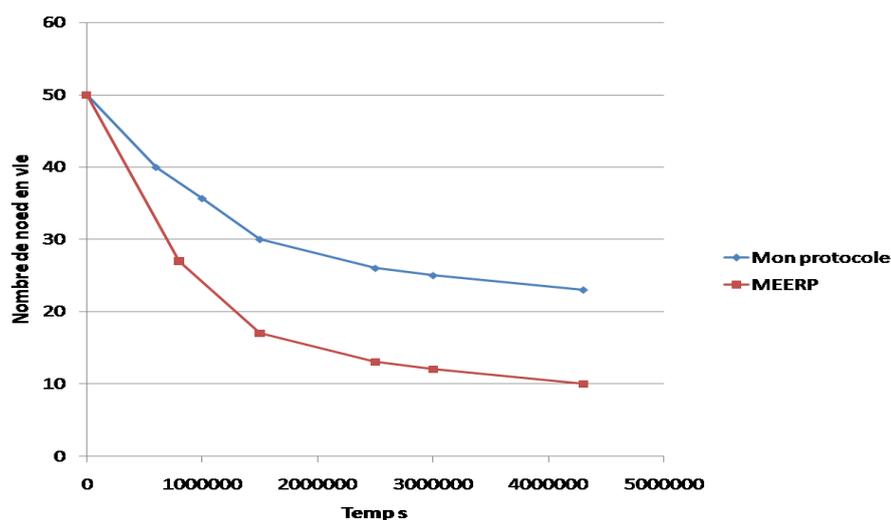


FIGURE 4.5 – Nombre de nœuds en vie en terme du temps de simulation.

Et à partir de ces résultats, il s'avère que notre protocole permet une distribution de la charge du trafic circulant dans le réseau sur tous les nœuds capteurs de manière très efficace par rapport au protocole MEERP[74] ; ce qui permet de prolonger significativement la durée de vie des nœuds capteurs et ainsi prolonger la durée de vie du réseau entier.

– La latence moyenne

On remarque la latence moyenne obtenue avec notre protocole est meilleure que celle obtenue avec le protocole MEERP[74].

On remarque aussi que la latence moyenne marquée par notre protocole augmente régulièrement avec le nombre de nœuds. Et cela se justifie, par le nombre de nœuds visités par le paquet le long de son chemin ; plus il y a de nœuds dans le réseau, plus il y a de nœuds dans le chemin. D'après ces résultats, on peut constater que notre protocole est meilleur que MEERP[74].

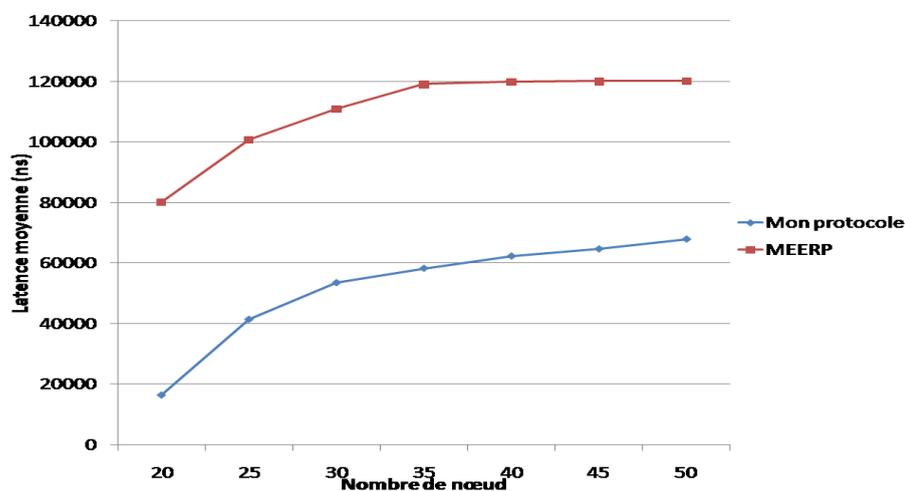


FIGURE 4.6 – Latence moyenne en terme du nombre de nœuds.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée d'un nouveau protocole de routage multipath pour les réseaux de capteurs sans fil, qui minimise la consommation d'énergie et qui garantit la livraison des paquets entre la source et la destination tout en exposant son principe de fonctionnement pour sélectionner le prochain chemin.

D'après les résultats de la simulation, on conclut que la forte densité du réseau permet d'augmenter le taux de livraison des paquets vers la station de base ; par contre, elle influe négativement sur la consommation d'énergie, ce qui réduit la durée de vie du réseau. En revanche, la faible densité du réseau permet de réduire la consommation d'énergie ; ce qui prolonge la durée de vie du réseau ; cependant, elle réduit le taux de livraison.

Par ailleurs, les résultats de simulation ont prouvé que notre protocole réduit l'énergie consommée au niveau des nœuds capteurs conduisant ainsi à une prolongation de la durée de vie du réseau entier. De même, il augmente le taux de livraison des données entre les nœuds et la station de base et surtout dans les réseaux denses.

Conclusion générale et Perspectives

LA conception des réseaux de capteurs est fortement influencée par la limitation de la ressource énergétique disponible au niveau des nœuds capteurs. Pour cela, l'objectif primordial des concepteurs des réseaux de capteurs sans fil est l'augmentation de la durée de vie de ce type de réseaux. Actuellement, la plupart des travaux de recherche sur ce type de réseaux, sont consacrés à la conception des protocoles de routage visant à minimiser l'énergie inhérente aux communications qui sont la source principale de consommation d'énergie afin d'optimiser la durée de fonctionnement du réseau.

Dans cette optique, le routage multi-chemins s'est présenté comme étant une solution prometteuse pour conserver l'énergie des nœuds, et faciliter la transmission des données capturées dans le réseau vers la station de base.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la problématique de l'économie d'énergies lors du routage et l'amélioration de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. Ce problème est causé par le fait que les réseaux de capteurs sont déployés dans des environnements inaccessibles et que leurs batteries à faible puissance ne peuvent pas être rechargées. Alors, il est indispensable de gérer le niveau d'énergie des nœuds de manière économique afin de prolonger la durée de vie du réseau. Pour cela, nous avons réalisé, dans un premier temps, un état de l'art sur les approches de routage et une étude critique d'un ensemble des protocoles de routage multi-chemins minimisant la consommation d'énergie dans les RCSFs. afin de proposer, dans un second temps, un nouveau protocole de routage multi-chemin à basse consommation d'énergie qui est piloté par la station de base. Ce dernier, vient pour prendre en considération des contraintes locales des capteurs tels que l'énergie résiduelle, et des contraintes globales qui nécessitent à trouver des routes existantes entre la source et la station de base. Puis choisir la route optimale selon le nombre de sauts et l'énergie résiduelle.

Ce protocole se base sur les ressources énergétiques utilisées par les nœuds pour sélectionner une route parmi l'ensemble des routes existantes, il permet de réduire significativement la perte énergétique comme il permet d'équilibrer la durée de vie de tous les nœuds, et par conséquent, augmente la durée de vie du réseau. Cela est montré dans le dernier chapitre, lors de la comparaison de notre protocole avec le protocole MEERP.

Comme perspectives de notre travail, nous envisageons dans les travaux futurs d'investiguer des mécanismes de gestion de la qualité de service pour les réseaux de capteur, tout en garantissant une répartition efficace de la consommation d'énergie et une connectivité globale aux utilisateurs fortement mobiles.

Le protocole que nous avons élaboré s'applique sur les réseaux ayant une structure plate. Ce dernier peut être adapté pour supporter les structures hiérarchiques.

Le but est de pouvoir appliquer facilement la réduction de nombre de messages circulant dans le réseau et ainsi obtenir un gain en matière d'énergie. Autres perspectives, nous voulons introduire le mécanisme d'agrégation des données au niveau de chaque nœud en éliminant les données redondantes en minimisant le temps d'acheminement des paquets.

Bibliographie

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. L. Cayirci. *Wireless sensor networks : A survey*. IEEE Computer Networks, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, 2002.
- [2] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi and G. Pottie. *Protocols for self-organization of a wireless sensor network*. IEEE Personal Communications, Vol.7, No.5, pp.16-27, 2000.
- [3] H. Karl and M. Löbbers. *A Data Aggregation Framework for Wireless Sensor Networks*. Technical University Berlin. Telecommunication Networks Group, 2003.
- [4] R. Yan, H. Sun and Y. Qian , *Energy-Aware Sensor Node Design With Its Application in Wireless Sensor Networks*.IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, VOL.62, NO.5,2013.
- [5] J. Ceçlio, J. Costa and P. Furtado, *Survey on Data Routing in Wireless Sensor Networks*.Springer-Verlag Berlin Heidelberg,2010.
- [6] A. Cerpa and D. Estrin. *Ascent : Adaptive self-organizing sensor networks topologies*. IEEE Transactions on Mobile Computing, 3(3) :272285, 2004.
- [7] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park and M. B. Srivastava, *Energy-Aware Wireless Microsensor Networks*. IEEE Signal Processing Magazine , 40-50, 2002.
- [8] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. l. Cayirci. *Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors*. Proceedings of the Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Pages : 166179, 2001.
- [9] L. Samper. *Modélisations et Analyses de Réseaux de Capteurs*. Thèse de doctorat, institut national polytechnique, Grenoble, France, 2008.
- [10] S. Slijepcevic and M. Potkonjak. *Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks*. IEEE International Conference on Communications, 2 : 472-476, 2001.
- [11] S. Hedetniemi and A. Liestman. *A survey of gossiping and broadcasting in communication networks*. Networks (New York, NY), 18(4) :319349, 1988.
- [12] A. Wang and A. Chandrakasan. *Energy-efficient dsps for wireless sensor networks*. IEEE Signal and Processing Magazine, pages 6878, 2002.
- [13] 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, 2004.
- [14] S. Meguerdichian, F. Koushanfar , M. Potkonjak and M. Srivastava *Coverage problems in wireless add-hoc sensor networks*. Proceedings of IEEE Infocom, Vol. 3, p. 1380-1387, 2001.

Références bibliographiques

- [15] M. T.Thai 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.
- [16] A. Gupta and N.Kumar. *Term Paper Report on Acquiring information from smart badges in an emergency network*. Advanced Computer Networks, 2002.
- [17] S.C.Visweswara. *An Automatic Adaptive Ad-hoc Algorithm for Power Conservation in Sensor Networks using Switch-off*. Master's Thesis, Department of Computer Science, Faculty of North Carolina State University, 2004.
- [18] G. Mao, B. Fidan and B.D. Anderson. *Wireless sensor network localization techniques*. Elsevier Computer Networks Journal, 51(10) : 2529-2553, 2007.
- [19] I. Dietrich and F. Dressler. *On the lifetime of wireless sensor networks*. ACM Transactions on Sensor Networks, 5(1) : 1-39, 2009.
- [20] S. Basagni. *Distributed clustering for ad hoc networks*. Proceedings of the International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPA), pages 310315,USA, 1999.
- [21] S. Paul. *Application des algorithmes de haute résolution à la localisation de mobiles en milieu confiné* . Thèse de Doctorat en informatique, l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2010.
- [22] M.S. Obaidat, S. Misra and M. P. Kumar. *Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks*. Elsevier Journal of Computer Communications 34 (2011) 1484-1496, 2010.
- [23] E. H. Callaway. *Wireless Sensor Networks : Architectures and Protocols*. CRC Press, 2004.
- [24] N. Mitton. *Réseaux de capteurs sans fil-De nouveaux défis*. Edition techniques de l'Ingenieur.249, rue de Crimée 75019 Paris France, 2013.
- [25] Arvind Giridhar and P. R. Kumar. *Maximizing the functional lifetime of sensor networks*. In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in SensorNetworks (IPSN-05), page 2, Piscataway, NJ, USA,2005.
- [26] K. Beydoun. *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*. Thèse de Doctorat en informatique, Université de Franche-Comté des sciences et techniques,2009.
- [27] T. Banka, G. Tandon and A. P. Jayasumana. *Zonal rumor routing for wireless sensor networks*. Proc of the international Conference on Information Technology : Coding and Computing, IEEE, 2005.
- [28] P. Rentala, R. Musunnuri, S. Gandham and U. Saxena. *Survey on Sensor Networks*. University of Texas, Dallas.
- [29] J. Deng, Y. S. Han, W. B. Heinzelman and P. K. Varshney. *Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks*. Mobile Networks and Applications, 10(6) : 825-835, 2005.
- [30] T. Nieberg, S. Dulman, P. Havinga, Lodewijk v. Hoesel and J. Wu. *Collaborative Algorithms for Communication in Wireless Sensor Networks*. 2003.
- [31] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin. *GPS-less low cost outdoor localization for very small devices*. Technical report 00729, Computer science department, University of Southern California,2000.

- [32] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. *TEEN : A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks*. Proceedings of the International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001.
- [33] K. Hellman and M. Colagrosso, *Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies*, Journal of Interconnection Networks, 7(1) :91-99, 2006.
- [34] M. Ilyas and I. Mahgoub. *Handbook of sensor networks compact wireless*. Technical report, 2005.
- [35] S. Rizvi, H. K. Qureshi, S. A. Khayam, V. Rakocevic and M. Rajarajan *A1 : An energy efficient topology control algorithm for Connected area coverage in wireless sensor networks*. Elsevier Journal of Network and Computer Applications 35 (2012) 597-605, 2011.
- [36] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin. *Geography informed Energy Conservation for Adhoc Routing*. In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Pages : 7084, 2001.
- [37] V. Rajavavivarme, Y. Yang and T. Yang. *An overview of wireless sensor network and applications*. In Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, pages 432-436, 2003.
- [38] A. Milenkovic. *Wireless sensor networks for personal health monitoring : issues and implementation*. Elsevier, 2006.
- [39] C. José, C. Joo and F. Pedro. *Survey on Data Routing in Wireless Sensor Networks*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [40] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu 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.
- [41] J. H. Chang and L. Tassiulas. *Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks*. Proceedings. IEEE, INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 1, 2000.
- [42] Q. Li, J. Aslam and D. Rus. *Hierarchical power-aware routing in sensor networks*. Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking, 2001.
- [43] 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, 2001.
- [44] M. Achir and L. Ouvry. *A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi- Path Source Routing Protocol (MPSR)*. ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE), Ile de la Réunion, 2005.
- [45] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin. *Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks*. Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking, 2000.
- [46] W. Heizelman, J. Kulik and H. Balakrishnan. *Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks*. Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 174-185, 1999.
- [47] D. Dhoutaut. *Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc de la simulation à l'expérimentation*. Thèse de doctorat, INRIA ARES, Laboratoire CITI, INSA de Lyon, 2003.

- [48] S. Lindsey and C. S. Raghavendra. *PEGASIS : Power efficient gathering in sensor information systems*. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Vol. 3, 2002.
- [49] C. D. Braginsky and D. Estrin. *Rumor routing algorithm for sensor networks*. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA), pp. 22-31, ACM Press New York, NY, USA, 2002.
- [50] R. Shah and J. M. Rabaey. *Energy aware routing for low energy ad-hoc sensor networks*. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Vol. 1, 2002.
- [51] D. Simplot-Ryl. *Some real-time issues in wireless sensor networks*. Technical Report, IRCICA/LIFL, Univ. Lille 1 CNRS UMR 8022, INRIA Futurs, Ecole d'été Temps Réel, 2005.
- [52] H. S. Kim, T. F. Abdelzaher and W. H. Kwon. *Minimum energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks*. Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), ACM Press New York, NY, USA, Vol. 7, No. 5, pp. 193-204, 2003.
- [53] H. Balakrishnan W. Heinzelman and A. Chandrakasan. *editor Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks*. IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [54] Akkaya and M. Younis. *A survey on routing protocols for wireless sensor networks Ad Hoc Networks*. volume Vol. 3 PP. 325-349 of N. 3, 2005.
- [55] Q. Jiang and D. Manivannan. *Routing protocols for sensor networks*. In Proceedings of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2004), Las Vegas, Nevada, USA, 2004.
- [56] Y. Yao and J. Gehrke. *The cougar approach to in-network query processing in sensor networks*. ACM SIGMOD Record, 31(3) :918, 2002.
- [57] P. Rentala, R. Musunnuri, S. Gandham and U. Saxena. *Survey on Sensor Networks*. University of Texas, Dallas, 2003.
- [58] O. Younis and S. Fahmy . *HEED : A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks for Networked Sensors*. IEEE Transactions on mobile computing, vol. 3, no. 4, 2004.
- [59] R. Marin-Perianu . *Wireless Sensor Networks in Motion : Clustering Algorithms for Service Discovery and Provisioning*. thèse de doctorat , University of Twente, 2008.
- [60] K. Holger and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2005.
- [61] R. Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de Doctorat , Université de Toulouse , 2009.
- [62] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. *Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks*. Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, 2000.
- [63] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. *Wireless Integrated Network Sensors*. Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, 2000.
- [64] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal. *Wireless sensor network survey*. Computer Networks, vol. 52, no. 12, 2008.

- [65] B. Yahya and B. B. Othman. *J. REER :Robust and Energy Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '09), Honolulu, HI, USA ; pp. 17, 2009.
- [66] L. Gao, D. Liang, L. Gong and Y.Zhang. *S. Micro Sensor Multi-Path Routing Protocol in Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the International Symposium on Multimedia Technology, (CNMT '09), Wuhan, Hubei, China ; pp. 14, 2009.
- [67] Y. Chen and N. Nasser. *Energy-Balancing Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. Department of Computing and Information Science University of Guelph Canada, 2005.
- [68] S. Saqaeeyan and M. Roshanzadeh. *IEATH : Improved Energy Aware and Two Hop Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks*. I. J. Computer Network and Information Security, 2012, 5, 22-28 in MECS, 2012.
- [69] M. R. Mundada, V. CyrilRaj and T. Bhuvaneswari . *Energy Aware Multi-Hop Multi-Path Hierarchical (EAMMH) Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. European Journal of Scientific Research , Vol. 88 NO pp.520-530, 2012.
- [70] S.R. Heikalabad, H. Rasouli, F. Nematy and N. Rahmani. *QEMPAR : Qos and Energy aware Multi-Path Algorithm Routing for real-time applications in wireless sensor networks*. CoRR, abs/1104.1031, 2011.
- [71] J. Zhang and J. Li. *Load-balanced Route Discovery for Wireless Sensor Networks*. journal of networks, Vol. 5, No.9, 2010.
- [72] M. A. Razzaque and C. S. Hong. *A Low Overhead, Energy Efficient, Sink-initiated Multipath Routing Protocol for Static Wireless Sensor Networks*. Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University, Suwon, South Korea, 2009.
- [73] P. Erard and P. Deguenon. *Simulation par évènements discrets*. Presses polytechnique et universitaire Romandes , 1996.
- [74] S. V. Gole and S. V. Mallapur. *MEERP : Multipath Energy Efficient Routing Protocol*. International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS), 2011.