

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 de Recherche Opérationnelle

Mémoire de Master

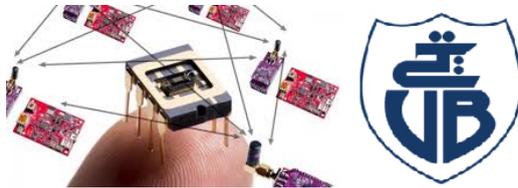
en

Recherche Opérationnelle

Option : Modélisation Mathématique et Evaluation des Performances dans les
Réseaux

Thème :

*Proposition d'un algorithme de routage
hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil*



Présenté par :

AYOUB *M^{ed}* Seghir & CHERABI Salim

devant le jury composé de :

Présidente	M ^{me} S.Ouyahia	M.C.B	U. A/Mira Béjaïa.
Rapporteur	M ^r D.Aissani	Professeur	U. A/Mira Bejaia.
Co-Rapporteur	M ^{me} N.Khoulalene	M.A.A	U. A/Mira Bejaia.
Examineur	M ^r M.Atmani	M.A.B	U. A/Mira Bejaia.
Examinatrice	M ^{me} A.Tiab	Doctorante	U. A/Mira Bejaia.

Remerciment

Nous remercions notre Dieu le tout puissant qui nous a accordé la volonté, la patience, et surtout la santé durant tout notre cursus.

Remercier, c'est le plaisir de se souvenir de tous ceux qui, par leurs encouragements, leur disponibilité, leur amitié et leurs compétences, ont su créer une ambiance de travail nous ayant permis de finaliser ce mémoire.

Nos plus sincères remerciements vont :

A notre encadreur le professeur " Aissani Djamil " et à notre Co-encadreur *M^{me}* " Khoulalene Nadjat " pour leurs conseils, leurs aides, pour leur soutien moral et scientifique efficace et constant, durant toute cette durée de travail.

A tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de prendre notre modeste travail en considération et en suite de le juger.

Nos profonds remerciements à nos parents qui nous ont encouragés, qui nous ont appris à travailler honnêtement, et nous ont offert tous les moyens afin d'apprendre.

Que tous ceux que nous avons cités et ceux dont on a omis les noms, trouvent ici l'expression de notre grande gratitude.

Dédicace

Je dédie mon travail

À mes chers parents ma mère et mon père
Pour leurs patience, leurs amour, leurs soutien et leurs encouragements.

À mes frères et mes sœurs.

À mon binôme Salim.

À mes amis et mes camarades en particulier Abdou.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou bien de l'enseignement supérieur.

Ayoub M^{ed} Seghir

Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents qui m'ont soutenus tout au long de ma vie.

À mes frères et sœurs.

À mon binôme Med Seghir.

À tous les amis qui m'ont encouragé ou aidé au long de mes études en particulier Abdou.

Cherabi Salim

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Introduction générale	1
1 Description des réseaux de capteurs sans fil	4
1.1 Introduction	4
1.2 Description d'un nœud capteur	4
1.3 Architecture d'un nœud capteur	5
1.3.1 L'unité d'acquisition des données	5
1.3.2 L'unité de traitement des données	5
1.3.3 L'unité de transmission de données	6
1.3.4 La source d'énergie	6
1.4 Architecture d'un réseau de capteurs	7
1.5 Les différents facteurs de conception des RCSFs	8
1.6 Architecture protocolaire	9
1.7 Applications des réseaux de capteurs sans fil	10
1.8 Consommation d'énergie d'un nœud-capteur	12
1.8.1 Sources de surconsommation d'énergie	12
1.8.2 Mécanismes de conservation de l'énergie dans les RCSFs	12
1.9 Conclusion	13

2	Le routage dans les réseaux des capteurs sans fil	14
2.1	Introduction	14
2.2	Contraintes de conception des protocoles de routage pour RCSFs	15
2.3	Classification des protocoles de routage dans les RCSFs	15
2.4	Les principaux protocoles de routage dans les RCSFs	16
2.4.1	Selon la méthode d'établissement de routes	17
2.4.2	Selon les paradigmes de communication	17
2.4.3	Selon le mode de fonctionnement du protocole	18
2.4.4	Selon la topologie de réseau	20
2.5	Conclusion	28
3	L'état de l'art : Quelques protocoles hiérarchiques récents	30
3.1	Introduction	30
3.2	Energy-Efficient Clustering Scheme to Prolong Sensor Network Lifetime (EECPNL)	30
3.2.1	Fonctionnement du protocole	31
3.3	Cluster based Multipath Routing Protocol	32
3.3.1	Fonctionnement du protocole	33
3.4	Distributed Energy efficient Clustering-based Hierarchy Protocol	35
3.4.1	Fonctionnement du protocole :	35
3.5	Le protocole Fast Connection WAveFont Extensible Routing	36
3.5.1	Fonctionnement du protocole	37
3.6	Multipath Ring Routing et Clustering pour les RCSFs	39
3.6.1	Fonctionnement du protocole	39
3.7	Efficient Cluster Head Selection Scheme for Data Aggregation in Wireless Sensor Network	41
3.7.1	Fonctionnement du protocole	42
3.8	Conclusion	44

4	Protocole proposé : Hybrid hierarchical protocol	45
4.1	Introduction	45
4.2	Modèles utilisés dans notre proposition	45
4.2.1	Modèle du réseau de capteurs	45
4.2.2	Modèle de communication radio :	46
4.3	Fonctionnement du protocole proposé	48
4.3.1	Phase d'installation du réseau	48
4.3.2	Formation des clusters	48
4.3.3	Transmission des données	51
4.4	Evaluation des performances	52
4.4.1	Modèle de simulation	52
4.4.2	Environnement de simulation	52
4.4.3	Résultats de simulation	53
4.5	Conclusion	55
	Conclusion et perspectives	56
	Bibliographie	58
	Résumé	60

Table des figures

1.1	Capteur sans fils	5
1.2	Architecture d'un nœud capteur	6
1.3	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	7
1.4	Pile protocolaire pour les RCSFs	10
1.5	Quelques domaines d'applications des RCSFs	11
2.1	Les principaux protocoles de routages dans les RCSFs	16
2.2	Protocole à topologie plate	20
2.3	Le fonctionnement de SPIN	21
2.4	Les phases de communication du protocole Directe Diffusion	22
2.5	Topologie hiérarchique	25
2.6	Architecture du protocole de routage hiérarchique LEACH	26
2.7	Formation des clusters par LEACH	27
3.1	Cluster head et head-list des différents clusters.	32
3.2	Les nœuds envoient le paquet Nbr INFO à la station de base.	33
3.3	La zone de CHCNs.	37
3.4	Le noeud c agit en tant que nouveau cluster head après affirmation, et le noeud b désigné comme un noeud membre.	38
3.5	Les deux premiers niveaux de l'architecture de cheminement constituée par le protocole de FC-WAFER.	39
3.6	Diffusion des données.	41
3.7	Noeuds capteurs regroupés en clusters.	42

3.8	Noeuds capteurs qui envoient leurs énergies à la station de base.	43
3.9	Choix des noeuds ayant plus d'énergie comme CH.	43
3.10	Noeuds capteurs qui envoient des données au CH.	44
3.11	Noeuds capteurs qui envoient des données à l'ACH lorsque l'énergie du CH est inférieure à celle de l'ACH	44
4.1	Modèle d'antenne.	47
4.2	Diffusion de données.	51
4.3	Modèle d'expérimentation.	53
4.4	Noeuds vivants durant les rounds.	53
4.5	La quantité des données reçues par la station de base.	54

Liste des tableaux

2.1	Classification et comparaison de quelques protocoles de routages dans les réseaux de capteurs	28
4.1	Caractéristiques d'antenne	48

Liste des acronymes

ACH : Active Cluster Head.

Ah : Ampèreheures.

APTEEN : Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient Network protocol.

CH : ClusterHead.

CMRP : Cluster based Multipath Routing Protocol.

DAM : Distributed Aggregate Management.

DD : Diffusion Direct.

DECHP : Distributed Energy efficient Clustering-based Hierarchy Protocol.

EBAM : Energy-Based Activity Monitoring.

ECHSSDA : Efficient Cluster Head Selection Scheme for Data Aggregation in Wireless Sensor Network.

EECPNL : Energy-Efficient Clustering Scheme to Prolong Sensor Network Lifetime.

EMLAM : Expectation-Maximization Like Activity Monitoring.

FC-WAFER : Fast Connection WAVEFont Extensible Routing.

GAF : Geographic Adaptive Fidelity.

GEAR : Geographic and Energy Aware Routing.

GSM : Global System for Mobile Communications

LAN : Local Area Network.

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

MAC : Medium Access Control.

MEMS : Microelectromechanical systems.

MRRC : Multipath Ring Routing et Clustering pour les RCSFs.

PEGASIS : Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems.

QoS : Quality of Service.

RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil.

RAM : Random Access Memory.

RETV : Residual Energy Threshold Value.

ROM : Read-Only Memory.

RSSI : Recieved Signal Strength Indication.

SAR : Sensor Aggregates Routing.

SPIN : Sensor Protocols for Information via Negotiation.

TDMA : Time Division Multiple Access.

TEEN : Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol.

WSN : Wireless Sensor Network.

Introduction générale

Les progrès réalisés dans le domaine des réseaux sans fil ont contribué à l'évolution de l'Internet en facilitant l'accès aux usagers indépendamment de leur position géographique [38]. L'évolution dans le domaine des communications sans fil et l'informatique mobile gagne de plus en plus une popularité et les composants mobiles deviennent de plus en plus fréquents. Comme beaucoup de développements technologiques, les réseaux de capteurs sans fil ont émergé pour des besoins militaires tels que la surveillance sur le terrain de combat. Puis, ils ont trouvé leur chemin pour des applications civiles. Aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil sont devenus une technologie clé pour les différents types d'environnements intelligents.

De nos jours, les RCSFs nous aident par exemple à avoir un bon système de sécurité à la maison. Ces réseaux sont d'une importance particulière quand un grand nombre de nœuds de capteurs doivent être déployés, dans des situations dangereuses. Par exemple, pour une gestion des catastrophes, un grand nombre de capteurs peuvent être largués par hélicoptère. Ces capteurs peuvent aider à réaliser des opérations de sauvetage en localisant les survivants, pour l'identification des zones à risque ou pour renseigner l'équipe de secours. Cette demande de réseaux de capteurs peut non seulement accroître l'efficacité des opérations de sauvetage, mais aussi assurer la sécurité de l'équipe de secours. Les réseaux de capteurs sont constitués de plusieurs capteurs minuscules ou nœuds ayant une caractéristique essentielle résidant dans l'absence d'infrastructure fixe et ayant une topologie changeante due à la mobilité des capteurs et pose le problème de l'épuisement de leurs batteries [38].

Dans de nombreuses applications, on veut recueillir les données de tous les capteurs dans une station spécifique pour le traitement, ou pour l'archivage. Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil ou les WSNs "Wireless Sensor Networks" sont le protocole de routage, l'énergie consommée par le nœud, la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité imprévisible des nœuds, etc. Ces capteurs sont parfois déployés dans des zones hostiles. Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour augmenter sa durée de vie en

réduisant la perte d'énergie tout en étant réactif aux changements de l'environnement.

L'objectif principal de notre protocole est de trouver des techniques de routage efficaces en termes d'énergie afin que la durée de vie du réseau soit maximisée.

Pour réaliser cet objectif, nous proposons un protocole dénoté Hybrid Hierarchical Protocol, ce dernier utilise une hybridation de deux protocoles DECHP et MRRC présentés dans le troisième chapitre, en divisant le réseau en plusieurs rings et créer un modèle de communication inter-clusters dans le but d'augmenter la durée de vie de réseau.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres, selon le plan méthodologique suivant :

- Le chapitre 1 présente une description générale des réseaux de capteurs sans fil ainsi que leurs caractéristiques, contraintes et spécificités.
- Le deuxième chapitre est consacré à la problématique du routage et présente différents types de protocoles classiques de routage.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons l'état de l'art de quelques protocoles de routage récents.
- Le chapitre 4, constitue le cœur de notre travail. Dans ce chapitre, nous présentons l'algorithme de clustering proposé.

1

Description des réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine des microsystèmes électromécaniques ainsi que des techniques de communication sans fil ont permis de voir apparaître un nouveau type de réseau : les réseaux de capteurs sans fil **RCSFs** [12]. Ces réseaux sont composés d'un ensemble de petits appareils, ou capteurs, possédant des ressources particulièrement limitées, mais qui leur permettent de collecter et transmettre des données environnementales (la température, l'humidité, la présence d'un gaz. ...) vers un ou plusieurs points de collecte.

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fils, leurs caractéristiques, leurs domaines d'applications, et la consommation d'énergie de ses petits appareils.

1.2 Description d'un nœud capteur

Un nœud capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique observée (température, pression, humidité, etc.) en une grandeur utilisable (intensité électrique, position d'un flotteur). Pour

cela, il possède au moins un transducteur dont le rôle est de convertir une grandeur physique en une grandeur analogique ou numérique [15].

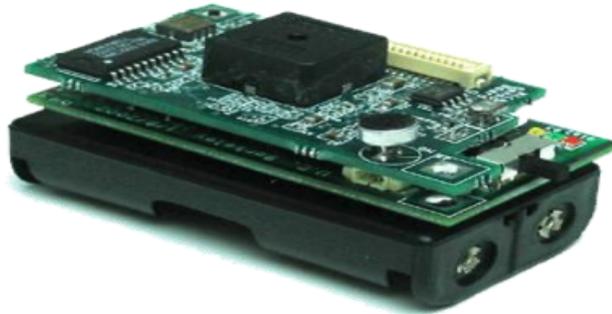


FIGURE 1.1 – Capteur sans fils

1.3 Architecture d'un nœud capteur

Un nœud-capteur est composé de plusieurs éléments ou modules correspondant chacun à une tâche particulière d'acquisition, de traitement, ou de transmission de données. Il comprend également une source d'énergie [13, 9].

1.3.1 L'unité d'acquisition des données

le principe de fonctionnement des détecteurs est souvent le même : il s'agit de répondre à une variation des conditions d'environnement par une variation de certaines caractéristiques électriques. Les variations de tension sont ensuite converties par un convertisseur Analogique-Numérique, ces dernières sont traitées par l'unité de traitement. Nous trouvons aussi des structures plus complexes pour détecter d'autres phénomènes : les MEMS (pour Microelectromechanical systems)[14, 13]. Ils sont utilisés pour une grande variété de phénomènes physiques (accélération, concentration chimique...).

1.3.2 L'unité de traitement des données

les microcontrôleurs utilisés dans le cadre des réseaux de capteurs sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes [18, 13]. Cette mémoire consomme

la majeure partie de l'énergie allouée au microcontrôleur, c'est pourquoi on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie. Outre le traitement des données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission.

1.3.3 L'unité de transmission de données

Les composants utilisés pour réaliser la transmission sont des composants classiques. Ainsi, nous retrouvons les mêmes problèmes que dans tous les réseaux sans-fil : la quantité d'énergie nécessaire à la transmission augmente avec la distance. Pour les réseaux sans-fil classiques (LAN, GSM) la consommation d'énergie est de l'ordre de plusieurs centaines de milliwatts, alors que pour les réseaux de capteurs, le système de transmission consomme environ 20 mW et possède une portée de quelques dizaines de mètres. Pour augmenter ces distances tout en préservant l'énergie, le réseau utilise un routage multi-sauts.

1.3.4 La source d'énergie

Pour des réseaux de capteurs sans fil autonomes, l'alimentation est une composante cruciale. Il y a essentiellement deux aspects : premièrement, stocker l'énergie et la fournir sous la forme requise ; deuxièmement, tenter de reconstituer l'énergie consommée par un réapprovisionnement grâce à une source externe au nœud-capteur telles les cellules solaires. Le stockage de l'énergie se fait traditionnellement en utilisant ses piles. À titre indicatif, ça sera souvent une pile AA normale d'environ 2.2-2.5 Ah (Ampèreheures) fonctionnant à 1.5 V [18].

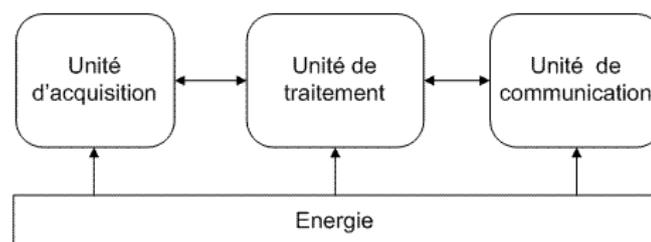


FIGURE 1.2 – Architecture d'un nœud capteur

1.4 Architecture d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteur sans fil ou Wireless Sensor Network (WSN) en anglais, consiste en un ensemble de nœuds capteurs variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers, placés de manière plus ou moins aléatoire, dans une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données d'une manière autonome.

Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelé nœud puits (Sink en anglais), ou station de base (base station).

Le puits transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central (Gestionnaire de tâches) pour analyser ces données et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits.

En plus des nœuds capteurs, le modèle peut introduire les super-nœuds appelés les passerelles (Gateways)[16]. Ces dernières possèdent une source d'énergie importante, la capacité de traitement et stockage est plus élevées comparativement aux nœuds capteurs [16]. Ils peuvent ainsi être utilisés pour exécuter des tâches plus complexes comme la fusion des données issues des capteurs d'une même zone. Dans le cas le plus simple, les nœuds capteurs seront dans le voisinage direct du puits (communication à un a un saut). Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelles, les nœuds ne sont pas tous dans le voisinage du puits. Dans ce cas, les données seront acheminées du nœud source vers le puits en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts comme l'illustre la figure 1.3 ci-après :

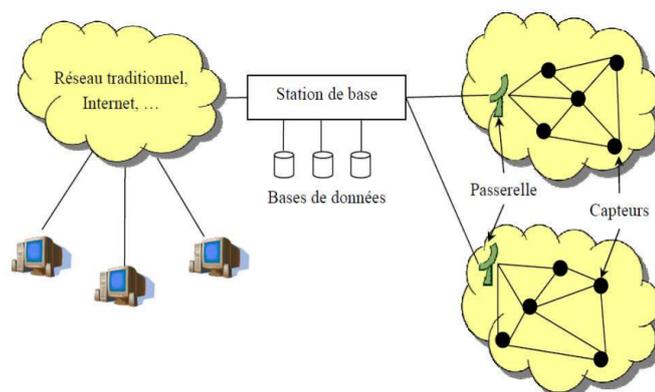


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

1.5 Les différents facteurs de conception des RCSFs

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs comme la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environnement ou la topologie du réseau. Ces facteurs représentent la base de la conception des protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs.

- a) **Tolérance aux pannes** : les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption.
- b) **L'extensibilité (passage à l'échelle)** : l'une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs.
- c) **L'environnement** : les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité.
- d) **Coût de fabrication** : les nœuds sont des produits fabriqués en série du fait de leur grand nombre. Il faut que le coût de fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt [37].
- e) **Topologie du réseau** : 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.

Nous distinguons généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :

- **Déploiement** : les nœuds sont soit répartis de manière prédéfinie soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion). Il faut alors que ceux-ci s'organisent de manière autonome.
- **Post-Déploiement - Exploitation** : durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds ou bien à des pannes.
- **Redéploiement** : l'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

f) Consommation d'énergie : l'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner.

Les réseaux de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par sauts, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau.

g) Contrainte matérielles

Parmi les contraintes matérielles liées aux RCSFs, nous pouvons citer :

* **La dimension**

La taille réduite des capteurs peut présenter de nombreux avantages, elle permet un déploiement flexible et simple du réseau. Cependant, la puissance des batteries utilisées pour alimenter les nœuds capteurs est limitée, par la petite taille de ces derniers.

* **La puissance de calcul**

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

1.6 Architecture protocolaire

La pile protocolaire [37] utilisée par le puits (Sink) ainsi que par tous les nœuds-capteurs est donnée dans la Figure 1.4. Cette pile de protocoles combine routage et gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseau. Elle communique de manière efficace (en termes d'énergie) à travers le support sans fil et favorise les efforts de coopération entre les nœuds-capteurs. La pile de protocoles comprend une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique, un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches. Selon les tâches de détection, différents types de logiciels d'application peuvent être construits et utilisés dans la couche application. La couche transport contribue au maintien du flux de données si l'application du réseau de capteurs l'exige. La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport. Comme l'environnement est sujet au bruit et que les nœuds-capteurs peuvent être mobiles, le protocole MAC doit tenir compte de la consommation d'énergie et doit être en mesure de réduire les collisions entre les nœuds voisins lors d'une diffusion par exemple.

La couche physique répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception.

En outre, les plans de gestion d'énergie, de mobilité et des tâches surveillent et gèrent la consomma-

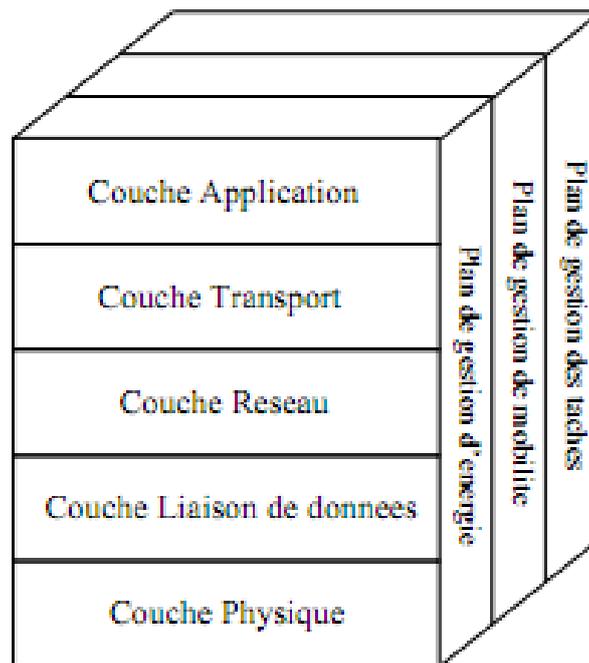


FIGURE 1.4 – Pile protocolaire pour les RCSFs

tion d'énergie, les mouvements, et la répartition des tâches entre les nœuds-capteurs. Ces plans aident les nœuds-capteurs à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie.

1.7 Applications des réseaux de capteurs sans fil

La miniaturisation des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs de se développer dans plusieurs domaines d'applications. La figure 1.5 montre quelques domaines d'applications des RCSFs.

- **Le transport** : la gestion du trafic, la déformation du réseau routier, les capteurs de pression des pneus, etc. sont des exemples d'applications de capteurs dans le domaine du transport.
- **L'environnement** : les RCSFs peuvent par exemple être utilisés à des fins de surveillance environnementale. En effet, des capteurs peuvent être placés dans des régions glaciaires ou

tropicales afin de suivre de manière précise les effets du réchauffement de la planète, les changements climatiques ou l'augmentation de la pollution.

- **Domaine médical (santé) :** le domaine médical peut lui aussi intégrer des applications pertinentes. Comme par exemple : l'aide à la médication et le suivi des patients à distance (rythme cardiaque, pression du sang, etc.), l'identification des allergies et des médicaments administrés aux patients, la localisation des docteurs et des patients dans l'hôpital, etc.
- **Domaine militaire :** le domaine militaire ne sera pas épargné non plus. Il pourra utiliser les RCSFs par exemple dans la détection et la collecte d'informations sur la position de l'ennemi et ses mouvements, la détection d'agents chimiques ou bactériologiques, etc.

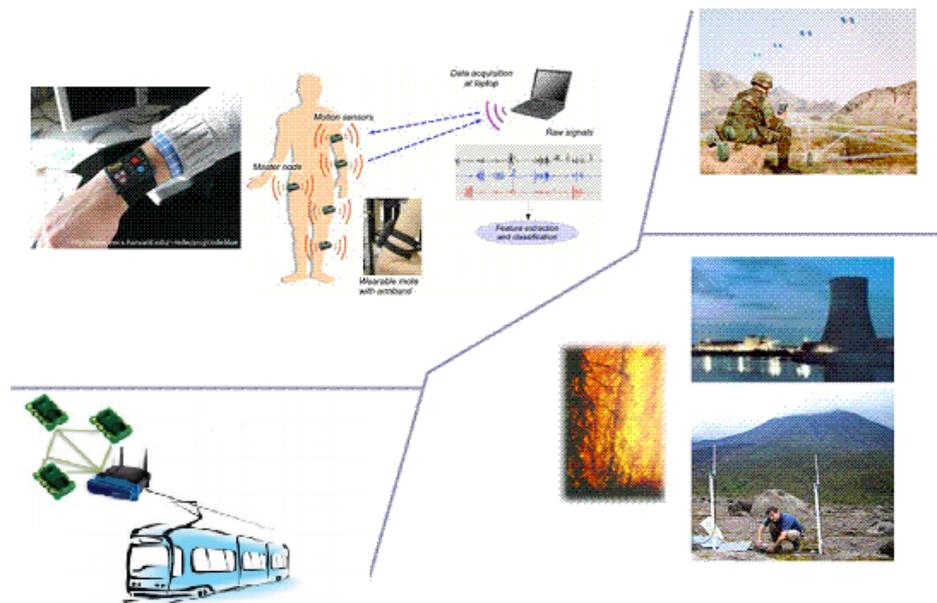


FIGURE 1.5 – Quelques domaines d'applications des RCSFs

1.8 Consommation d'énergie d'un nœud-capteur

1.8.1 Sources de surconsommation d'énergie

La surconsommation d'énergie est toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud-capteur. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses, elles peuvent être engendrées lors de la détection lorsque celle-ci est mal gérée (par exemple par une fréquence d'échantillonnage mal contrôlée).

La surconsommation concerne également la partie communication. En effet, cette dernière est sujette à plusieurs phénomènes qui surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC (pour Medium Access Control) où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et ont été recensés dans [34, 18] :

- **Les collisions** : elles sont la première source de perte d'énergie. Quand deux trames sont émises en même temps et se heurtent, elles deviennent inexploitables et doivent être abandonnées. Les retransmettre par la suite, consomme de l'énergie. Tous les protocoles MAC essaient à leur manière d'éviter les collisions. Les collisions concernent plutôt les protocoles MAC avec contention.
- **L'écoute à vide (idle listening)** : un nœud dans l'état " *idle* " est prêt à recevoir un paquet, mais il n'est pas en train de recevoir quoi que ce soit. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode " *idle* ". Eteindre la radio est une solution, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester " *raisonnable* ".
- **L'overhead des paquets de contrôle** : l'envoi, la réception, et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie. Comme les paquets de contrôle ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

1.8.2 Mécanismes de conservation de l'énergie dans les RCSFs

La transmission de données se révèle extrêmement consommatrice par rapport aux autres tâches du nœud-capteur. Cette caractéristique est conjuguée à l'objectif de maximisation de la durée de vie du réseau. Nous introduisons dans ce paragraphe certains mécanismes de base [22] :

- * **Mode d'économie d'énergie** : ce mode est possible quelle que soit la couche MAC adoptée. Cela consiste à éteindre le module de communication dès que possible. Par exemple, des protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA (Time Division Multiple Access) offrent une solution implicite puisqu'un nœud n'échange des messages que dans les intervalles de temps qui lui sont attribués. Il peut alors garder sa radio éteinte durant les autres slots. Comme nous l'avons souligné précédemment, il faut toutefois veiller à ce que le gain d'énergie obtenu en mettant en veille le module radio ne soit pas inférieur au surcoût engendré par le redémarrage de ce module.

- * **Traitement local** : l'idée de cette technique est que la source peut se censurer. Ainsi, une programmation événementielle semble bien adaptée aux réseaux de capteurs. Seuls les changements significatifs de l'environnement devraient provoquer un envoi de paquets dans le réseau. Dans le même état d'esprit, une grande collaboration est attendue entre les capteurs d'une même région en raison de leur forte densité et dans la mesure où les observations ne varient presque pas entre des voisins très proches. Ainsi, les données pourront être confrontées localement et agrégées au sein d'un seul et unique message. Cette stratégie de traitement local permet de réduire sensiblement le trafic.

- * **Limitation des accusés de réception** : l'acquittement systématique est mal adapté à des réseaux denses : il provoque une surcharge du réseau et donc des collisions et des interférences avec les données utiles échangées dans le réseau.

1.9 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ses applications : militaire, santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les RCSFs, leurs spécificités et les concepts nécessaires à la compréhension de ce type de réseaux. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau.

Ainsi, dans le chapitre suivant, nous introduisons les principaux protocoles de routage dans les RCSFs, les contraintes de conception de ces protocoles et leur classification.

2

Le routage dans les réseaux des capteurs sans fil

2.1 Introduction

Bien qu'un grand nombre d'applications mettent en jeu des RCSFs, ceux-ci ont plusieurs restrictions que ces applications doivent contourner. Par exemple, ils ont une faible puissance de calcul, une réserve d'énergie limitée et une bande passante réduite aux connections sans fil entre capteurs. Un des principaux objectifs dans la conception des RCSFs est la transmission fiable de données via une heuristique de préservation d'énergie et de prévention de perte de connectivité (e.g. aucun nœud isolé). Ceci est fait par l'utilisation d'une politique stricte de gestion d'énergie. En effet, la principale source de consommation d'énergie d'un capteur est l'utilisation du réseau sans fil via son module de radiocommunication.

Les protocoles de routage conçus pour les RCSFs sont influencés par un facteur déterminant, à savoir la consommation d'énergie. Les capteurs utilisent leur réserve d'énergie à des fins de calcul et de transmission de données. La durée de vie d'un capteur dépend essentiellement de celle de sa batterie. Dans un RCSF, chaque nœud joue le rôle d'émetteur et de routeur. La défaillance énergétique d'un capteur peut changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier.

De nombreuses stratégies de routage ont été créées pour les réseaux de capteurs sans fil. Certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux (principalement pour les réseaux sans fil au sens le plus large) tandis que d'autres ont été conçues spécialement pour les réseaux de capteurs sans fil.

2.2 Contraintes de conception des protocoles de routage pour RCSFs

Plusieurs contraintes doivent être prises en compte dans la conception des RCSFs :

- Limitations :
 1. **Energie** : toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau.
 2. **Bande-passante.**
- Absence d'adressage global.
- Données redondantes.
- Réseau à sources multiples / destination unique.
- Gestion des ressources.
- Capacité de calcul.
- Stockage.
- etc.

2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs

Récemment, les protocoles de routage pour les RCSFs ont été largement étudiés, Comme l'illustre la figure 2.1, ils peuvent être classés selon plusieurs critères :

- * selon la méthode d'établissement de routes.
- * selon les paradigmes de communication.
- * selon le mode de fonctionnement du protocole.
- * selon la topologie du réseau.

2.4 Les principaux protocoles de routage dans les RCSFs

La figure suivante résume les principaux protocoles de routage [4]

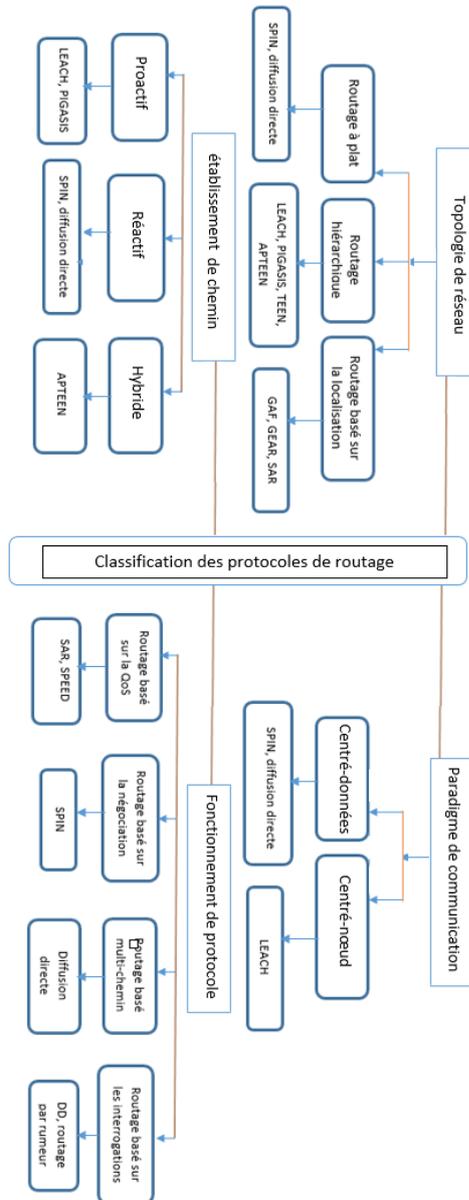


FIGURE 2.1 – Les principaux protocoles de routages dans les RCSFs

2.4.1 Selon la méthode d'établissement de routes

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage nous distinguons trois catégories de protocoles de routages : protocoles proactifs, réactifs ou hybrides [32].

- **Protocole proactif** : Ces protocoles de routage essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes. Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Et par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité, et n'enclencher leur dispositif de capture qu'à des instants particuliers.
- **Protocoles réactifs** : Ces protocoles (dits aussi, les protocoles de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée. Ce type de protocoles est pratique pour des applications temps réel où les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées. En effet, un prélèvement périodique des données aurait été inadapté pour ce type de scénarios.
- **Protocoles hybrides** : Ces protocoles combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone du voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

2.4.2 Selon les paradigmes de communication

Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans le RCSFs, il existe deux paradigmes de communication [30].

- **Centré-nœuds** : Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants (comme l'adresse IP). Les réseaux ad hoc utilisent ce genre de paradigme, qui s'intègre bien avec l'utilisation de ce type d'environnement. Cependant pour les réseaux de capteurs, un routage basé sur une identification individuelle des nœuds ne reflète pas l'usage réel du réseau. Pour cela, un autre paradigme a été introduit : Centré-données. Néanmoins, le paradigme Centre-nœuds n'est pas à écarter totalement, car certaines applications nécessitent une interrogation individuelle des capteurs.
- **Centré-données** : Dans les RCSF, la donnée est généralement plus importante que le nœud lui-même. De ce fait, le routage et l'identification, dans ce paradigme, se font en fonction des données disponibles au niveau des capteurs. Ainsi le système peut être vu comme une base

de données distribuée, où les nœuds forment des tables virtuelles, alimentées par les données captées [8]

2.4.3 Selon le mode de fonctionnement du protocole

Le mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être classifiés quatre catégories : routage basé sur la qualité de service “QoS” (Quality of Service “QoS” based routing), routage basé sur les requêtes (query-based routing), routage multi-chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing) [3].

- **Routage basé sur les multi-chemins** : Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu’un chemin simple afin d’augmenter la performance du réseau. La fiabilité d’un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Pour cette raison certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants, c.-à-d. : ils ne partagent qu’un nombre réduit (voire nul) de nœuds. Malgré leur grande tolérance aux pannes, ces protocoles requièrent plus de ressources énergétiques et plus de message de contrôle.
- **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. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leur données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent déjà de la donnée à transmettre.
- **Protocoles de routage basés sur les interrogations** La collecte des informations sur l’état de l’environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud ” Sink ”.

* Les protocoles de routage par rumeur

Le routage par rumeur [11] est principalement destiné pour des applications où le routage géographique n’est pas faisable. En général, la méthode (diffusion dirigée) utilise l’inondation pour envoyer la requête à l’ensemble du réseau où il n’y a pas de critère géographique pour diffuser les tâches. Toutefois, dans certains cas, peu de données sont demandées par les nœuds, donc l’utilisation d’inondation est inutile.

L’idée clé de cette méthode est de trouver les routes pour les requêtes vers les nœuds qui ont observé un événement particulier, plutôt que d’inonder tout le réseau pour récupérer des informations sur les événements survenus. Afin de diffuser un événement sur le réseau, l’algorithme de routage par rumeur emploie des paquets appelés agents.

Quand un nœud détecte un événement, il ajoute cet événement à sa table locale, appelée table d'événements et génère un agent. Cet agent parcourt le réseau afin de propager des informations sur des événements locaux pour les nœuds distants. Quand un nœud génère une requête pour un événement, les nœuds qui connaissent le chemin, répondent à la requête en inspectant leur table d'événements. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'inonder tout le réseau, ce qui réduit le coût de communication. D'autre part, ce routage n'utilise qu'un seul chemin entre la source et la destination au lieu de la diffusion dirigée où les données peuvent être acheminées par des routes multiples.

- **Protocoles de routage basés sur la QoS** Ce type de protocoles tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous citons : le délai de bout en bout, la gigue, PDR (Paquet Delivery Ratio), énergie consommée, ...etc.

* **Sensor Aggregates Routing (SAR)**

Fang et al. [31] ont proposé une approche de clustering pour l'agrégation des données dans les réseaux de capteurs surveillant plusieurs cibles. Ces cibles peuvent être stationnaires ou se déplaçant à n'importe quel moment indépendamment des états des autres cibles. L'objectif de cet algorithme est de déterminer le nombre de cibles et les localisations approximatives des clusters associés aux cibles dans la zone d'intérêt. Puis ils recalculent quand les cibles se déplacent, joignent, ou quittent la zone d'intérêt. Au début, les nœuds examinent les caractéristiques spatiales des signaux associés aux cibles quand plusieurs cibles sont dans la proximité les unes des autres. Puis, ils sont groupés en clusters selon la puissance du signal détecté de sorte qu'il y ait un seul pic par cluster. Un pic pourrait représenter une cible, plusieurs cibles proches, ou aucune cible quand le pic serait produit par les atténuations du signal. Le processus d'élection des cluster-heads se fait dans un voisinage et le nœud ayant le plus grand paysage de champ de signal parmi ses voisins se déclarera cluster-head. Ainsi, le choix des cluster-heads (Sensor Aggregates) se fait selon l'allocation des ressources aux tâches de détection et de communication.

Dans [4], Fang et al. ont proposé trois algorithmes pour la création des nœuds qui agrègent les données (Node Aggregates) :

- ✓ **DAM (Distributed Aggregate Management)** : est un protocole distribué conçu pour surveiller une cible. Il comporte un prédicat de décision P pour chaque nœud afin qu'il décide s'il devrait participer à l'agrégation de données et un arrangement d'échange de message M concernant la façon d'appliquer le prédicat de groupement aux nœuds. Le but de DAM est d'élire les cluster-heads et maintenir les informations locales sur le paysage du signal (la force du signal). Dans DAM, seuls les nœuds avec une puissance de signal

dépassant le seuil "ThresholdElection" peuvent participer au processus d'élection de cluster-heads.

- ✓ **EBAM (Energy-Based Activity Monitoring)** : est une extension de DAM. Il fournit une solution pour déterminer le nombre de cibles dans un cluster. Il suppose que chaque cible a la même puissance. Ainsi, lorsque la puissance d'une cible dans un cluster est connue, le nombre de cibles peut être déduit de la puissance totale du signal dans le cluster.
- ✓ **EMLAM (Expectation-Maximization Like Activity Monitoring)** : enlève la supposition que chaque cible a la même puissance. EMLAM estime les positions des cibles et l'énergie du signal à travers les signaux reçus et utilise les évaluations résultantes pour prévoir comment les signaux des cibles peuvent être fusionnés dans chaque capteur. Ce processus est réitéré jusqu'à ce que l'évaluation soit suffisamment bonne.

2.4.4 Selon la topologie de réseau

- **Les protocoles à topologie plate** Ce type de protocoles est le premier à être utilisé pour le routage dans les RCSFs. Son principe est simple, c'est le puits qui envoie des requêtes vers des zones spécifiques du réseau et attend l'arrivée des réponses des nœuds visés. L'utilisation des requêtes nécessite la mise en place d'un système de nommage global pour permettre la correspondance entre requête envoyée par les puits et les données recensées au niveau des nœuds.

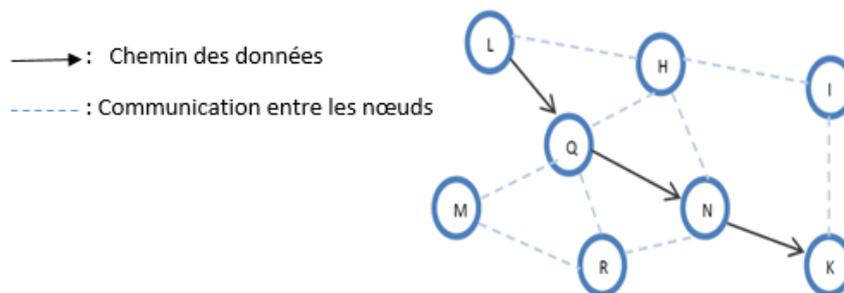


FIGURE 2.2 – Protocole à topologie plate

Deux exemples phares de cette classe de protocoles sont SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) de Heinzelman et autres [20] et DD (Direct Diffusion) de C. Intanagonwatt et autres [7].

a) Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)

SPIN [20] est parmi les premiers protocoles de routage Data-centric basé sur la négociation. SPIN est basé sur l'idée que les nœuds de capteurs opèrent plus efficacement et conservent l'énergie en envoyant des données qui décrivent les données des capteurs au lieu d'envoyer les données entières, à moins que les données entières ne soient explicitement demandées. Cela permet de palier au problème d'inondation. Pour cela, SPIN utilise trois types de messages : ADV (ADVetise), REQ (REQuest) et DATA.

Avant d'envoyer une donnée entière (message DATA), un nœud diffuse un message ADV qui contient la description, c-à-d méta-données, de la donnée en question. Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin (émetteur d'ADV). En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA. Les nœuds voisins répètent ainsi cette opération, comme la montre la figure 2.3. Comme résultat les nœuds qui sont intéressés par la donnée en auront une copie.

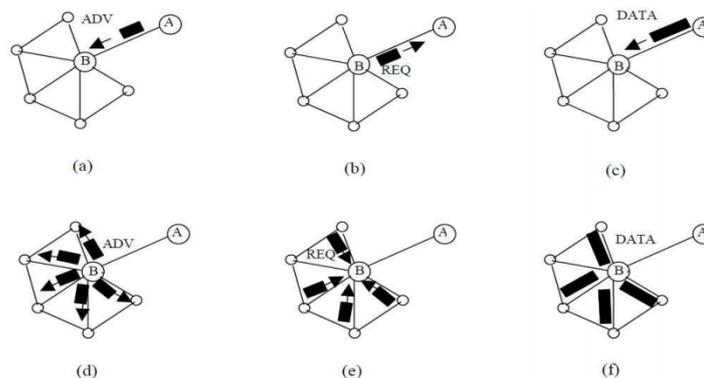


FIGURE 2.3 – Le fonctionnement de SPIN

b) Direct Diffusion (D D)

Diffusion Direct [11, 31] est un protocole de routage de catégorie data-centric, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. Le principe de fonctionnement du protocole DD est le suivant :

Le nœud (sink) commence à envoyer, vers tous les nœuds, un message INTEREST pour démarrer une application bien déterminée. Ce paquet sera acquitté par un autre appelé gradient. Un gradient est un lien de réponse de la part du voisin recevant l'intérêt. En utilisant les intérêts et les gradients, plusieurs chemins peuvent être établis entre le (sink) et la source. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue un nouveau ou un alternatif doit être identifié. La figure 2.4 suivante illustre les phases de fonctionnement de ce protocole.

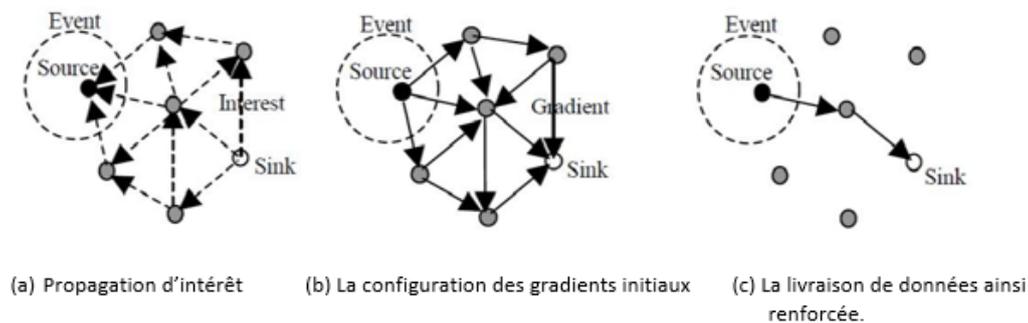


FIGURE 2.4 – Les phases de communication du protocole Direct Diffusion

- **Les protocoles de routage basés sur la localisation**

Les protocoles de routage basés sur la localisation [1] utilisent les informations d'emplacement pour guider la découverte de routage et la transmission des données. Ils permettent la transmission directionnelle de l'information en évitant l'inondation d'information dans l'ensemble du réseau. Par conséquent, le coût de contrôle de l'algorithme est réduit et le routage est optimisé. De plus, avec la topologie réseau basée sur des informations de localisation de nœuds, la gestion du réseau devient simple. L'inconvénient de ces protocoles de routage est que chaque nœud doit connaître l'emplacement des autres nœuds.

a) Geographic Adaptive Fidelity (GAF)

GAF [17] est un protocole de routage basé sur la localisation des nœuds. Il est conçu pour les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs. L'information de localisation utilisée dans GAF pourrait être fournie à l'aide d'un GPS ou d'autres techniques ou systèmes de localisation [29, 23]. GAF consiste à partitionner la zone où les nœuds sont déployés en des petites zones formant des grilles virtuelles telles que, pour deux grilles adjacentes G_i et G_j , tous les nœuds de G_i peuvent communiquer avec tous les nœuds G_j . Ainsi, avec cette politique de partitionnement, la fidélité du routage (routing fidelity) est assurée i.e. il existe au moins un chemin entre tout nœud du réseau et la station de base. Dans chaque grille, les nœuds élisent parmi eux un seul nœud pour rester à l'état actif et les autres passent à l'état sommeil pour une certaine période de temps. Ce nœud sera responsable pour surveiller et transmettre les données à la station de base. Par conséquent, GAF conserve l'énergie en faisant passer les autres nœuds de la grille à l'état sommeil sans affecter le niveau de la fidélité du routage.

Dans GAF, les nœuds peuvent être dans l'un des états suivants : Sommeil (Sleeping), Actif (Active), et Découvert (Discovery). Initialement, tous les nœuds sont dans l'état Découvert. Cet état a une durée T_d au cours de laquelle les nœuds échangent les messages Discovery pour trouver les autres nœuds dans la même grille. Après l'écoulement de la période T_d , les nœuds diffusent leurs messages Discovery et rentrent dans l'état actif. Puis au niveau de chaque grille, les nœuds élisent parmi eux un nœud pour rester à l'état actif pour une durée T_a et eux passent à l'état sommeil. Afin de supporter la mobilité, chaque nœud dans la grille estime son temps de départ de la grille et l'envoie à ses voisins. Les nœuds se trouvant dans l'état sommeil ajustent leur temps de sommeil T_s pour garder la fidélité du routage. Ainsi, après l'expiration de la période T_a , les nœuds se trouvant dans l'état sommeil se réveillent et un parmi eux passe à l'état actif. GAF assure la fidélité du routage tout en minimisant l'énergie dissipée dans tout le réseau. Cependant, dans les environnements où les nœuds sont fortement mobiles, le nœud actif pourrait quitter la grille. Ainsi, la fidélité du routage est réduite et par conséquent, le nombre de paquets perdus sera important.

b) GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)

Proposé en 2001, il est considéré comme une amélioration du protocole DD en se basant sur la géolocalisation et l'énergie des nœuds voisins. L'idée principale est de limiter le nombre et la diffusion des intérêts vers des zones spécifiques au lieu de l'ensemble du réseau. De cette façon une conservation d'énergie est obtenue par rapport à DD.

Pour choisir le meilleur chemin de routage, chaque nœud calcule deux coûts : un coût estimé qui est une combinaison de l'énergie résiduelle et la distance vers la destination et un autre acquis (learning) qui consiste en un réajustement du premier coût en prenant en compte le routage à travers les trous qui peuvent apparaître sur le réseau [36]. Un trou apparaît lorsqu'un nœud n'a aucun voisin sur un chemin vers le destinataire. Le coût acquis est propagé dans le sens inverse à chaque fois qu'un paquet est reçu par le destinataire pour ajuster le coût de la route pour les paquets qui vont suivre. Deux phases sont recensées dans cet algorithme :

1. **Diffusion des données vers la zone du destinataire** : dans ce cas, le paquet reçu sera routé à travers le nœud le plus proche de la zone du destinataire. S'il n'y a aucun nœud voisin mis à part le nœud lui-même (le cas d'un trou) un nœud parmi les voisins sera choisi en se basant sur le coût acquis.
2. **Diffusion des données dans la zone du destinataire** : une fois que le paquet arrive dans la zone concernée, il est diffusé soit d'une manière contrôlée ou bien d'une manière récursive géographiquement en partageant à chaque itération la zone concernée en quatre sous zones jusqu'à obtenir des zones avec un seul nœud. Il est à noter que la diffusion contrôlée est efficace sur les réseaux moins denses alors que la méthode récursive est plus rentable dans le cas contraire.

Les protocoles géographiques sont considérés comme une amélioration des protocoles à topologie plate en utilisant les informations géographiques des nœuds du réseau. Connaître sa position via le GPS génère un coût élevé lors de la fabrication du capteur. De plus, connaître la position des autres nœuds du réseau risque d'être plus coûteux en énergie lors de l'échange des messages des informations géographiques.

- **Les Protocoles hiérarchiques**

L'objectif principal du routage hiérarchique [1, 2] est de maintenir efficacement la consommation d'énergie de nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-hop au sein d'un cluster et en effectuant l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. La formation de clusters est généralement fondée sur la réserve d'énergie des capteurs et sur les capteurs qui sont à proximité du cluster-head.

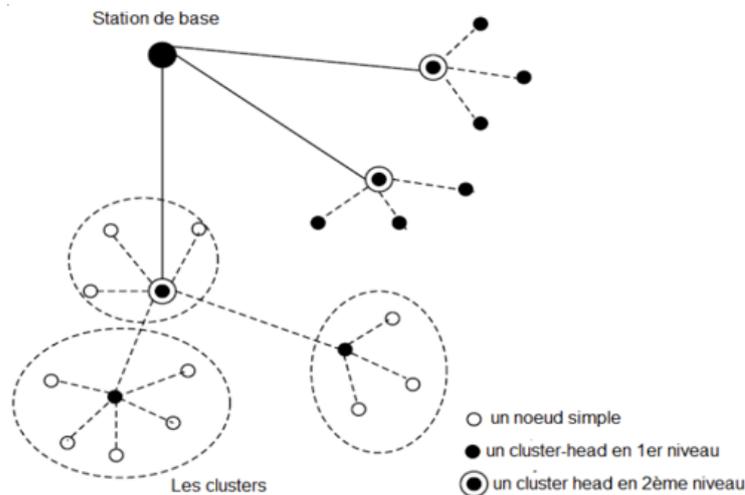


FIGURE 2.5 – Topologie hiérarchique

Il existe plusieurs méthodes de formation de clusters. Elles s'exécutent comme suit :

1) Auto-désignation des clusters-heads

1. Chaque noeud devra connaître son voisinage par le biais des messages Hello.
2. Chaque noeud prend la décision selon sa connaissance locale de la topologie pour être cluster-head ou non.
3. Le noeud choisi comme cluster-head diffuse son statut dans son voisinage et invite ses voisins qui ne sont pas encore affiliés à d'autres clusters de le rejoindre.

2) **Election des clusters-heads** : la phase d'élection de cluster-heads appelée aussi la phase Set-up utilise une métrique spécifique ou une combinaison de métriques pour chaque noeud telle que le plus grand/petit ID dans son voisinage, le degré de connectivité, la puissance de transmission, l'énergie restante ou la mobilité, ou bien un poids qui représente une combinaison de quelques métriques.

3) **Communication intra-cluster et inter-cluster** : chaque cluster-head se charge des communications à l'intérieur de son cluster et maintient les informations de routage lui permettant de joindre les autres cluster-heads. De plus, comme les cluster-heads ne sont pas directement reliés, des noeuds passerelles sont aussi élus et utilisés pour les communications entre cluster-heads.

4) **Maintenance des clusters** : dans le but de s'adapter aux changements de la topologie du réseau, une mise à jour des clusters est dynamiquement réalisée dans le cas où un cluster-head ou un membre migre d'un cluster C_i à un autre C_j . D'autre part, si le cluster-head

garde son statut le plus longtemps possible, même s'il ne possède pas le poids maximum dans son propre cluster alors il perdra son rôle une fois qu'il s'éteindra i.e. sa batterie sera épuisée [24].

a) Le protocole de routage "LEACH"

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical) [4] est l'une des premières approches de routage pour les réseaux de capteurs.

L'idée proposée par LEACH a été une inspiration pour de nombreux protocoles de routage hiérarchique, bien que certains protocoles aient été développés de manière indépendante.

La hiérarchie de regroupement d'adaptation à faible énergie (LEACH) proposée par Heinzelman et al. [4] est un protocole de routage hiérarchique bien connue appliqué dans les RCSFs.

LEACH divise le réseau en zones et clusters de façon distribuée, des nœuds CH (cluster-Head) sont constitués puis utilisés comme relais pour atteindre le puits en optimisant la consommation d'énergie suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des clusters heads pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds du réseau.

Un nœud décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus.

À la formation des groupes comme l'indique la figure 2.6, tous les nœuds non CH transmettent leurs données au cluster head. Quand le CH reçoit les données de tous les membres du groupe, il effectue des fonctions de traitement sur les données (par exemple agrège et compresse les données...), et les transmet à la station de base (SB) selon une communication unicast (à un seul saut).

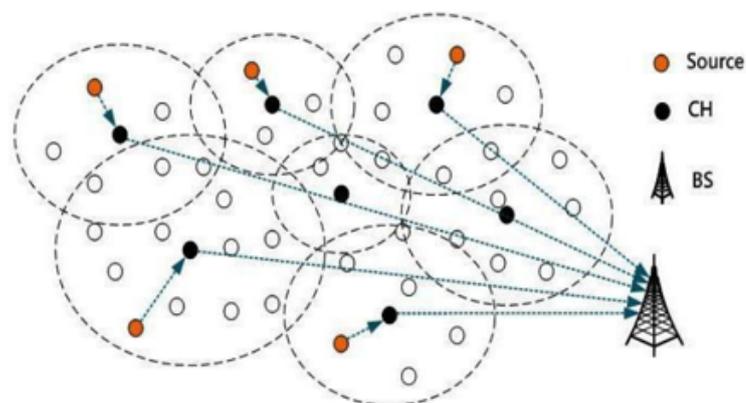


FIGURE 2.6 – Architecture du protocole de routage hiérarchique LEACH

LEACH est exécuté en deux phases : la phase "set-up" et la phase "steady-state" suivant la Figure 2.7. Dans la première phase, les clusters heads sont sélectionnés et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base aura lieu. Durant la première phase, le processus d'élection des clusters heads est déclenché pour choisir les futurs clusters heads. Ainsi, une fraction prédéterminée de nœuds s'élisent comme cluster heads selon le schéma d'exécution suivant : durant une période T , un nœud "n" choisit un nombre aléatoire "nb" dont la valeur est comprise entre 0 et 1 ($0 < nb < 1$). Si "nb" est inférieure à une valeur seuil alors le nœud "n" deviendra cluster head durant la période courante, sinon le nœud "n" devrait rejoindre le cluster head le plus proche dans son voisinage[35].

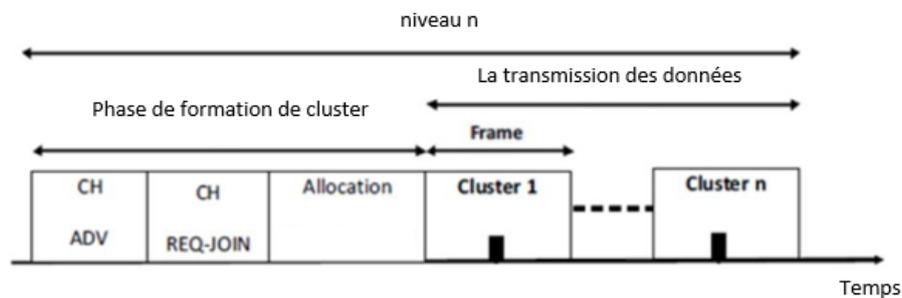


FIGURE 2.7 – Formation des clusters par LEACH

b) Les protocoles de routage "PEGASIS"(Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Lindsey et Raghavendra ont proposé une version améliorée de LEACH appelée PEGASIS. L'idée principale de PEGASIS est de former une chaîne entre les nœuds de sorte que chaque nœud reçoive et communique avec un voisin proche. Les données collectées sont transmises d'un nœud à un autre qui les agrège jusqu'à ce qu'elles arrivent à un nœud particulier qui les transmet à la station de base. Les nœuds qui transmettent les données à la station de base, sont choisis tour à tour selon un round-robin dans le but est de réduire l'énergie moyenne dépensée par un nœud durant une période (round). Contrairement à LEACH, PEGASIS évite la formation des clusters et procure à un seul nœud dans la chaîne l'envoi de données à la station de base[25].

En résumé, PEGASIS est adapté seulement aux capteurs sans fils dont les nœuds sont immobiles. Son évaluation dans des environnements mobiles pourrait dégrader considérablement ses performances.

c) TEEN et APTEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

TEEN est un protocole hiérarchique conçu pour être sensible aux changements imprévus des attributs détectés tels que la température. L'architecture du réseau est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds les plus proches forment des clusters. Après la construction des clusters, le cluster head diffuse deux seuils aux nœuds, qui sont la valeur minimale d'un attribut pour pouvoir être transmis et le degré minimale du changement de cet attribut. Le TEEN adaptatif (APTEEN) est une extension du TEEN basée sur la capture périodique des données et la réaction aux événements temps-réel. Quand la station de base forme les clusters, les cluster-heads diffusent les attributs, les seuils et le plan de transmission à tous les nœuds et effectuent également l'agrégation des données afin d'économiser l'énergie [10].

	Topologie	Mobilité	Agrégation	L'utilisation d'énergie
LEACH	Hiérarchique	Fixé	Oui	Max
PEGASIS	Hiérarchique	Fixé	Non	Max
TEEN et APTEEN	Hiérarchique	Fixé	Oui	Max
GAF	Géographique	Limité	Non	Limitée
GEAR	Géographique	Limité	Non	Limitée
SPIN	Plat	Possible	Oui	Limitée
RR	Plat	Très limité	Oui	Min
DD	Plat	Possible	Oui	Limitée
SAR	Géographique	Possible	Oui	Max

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

2.5 Conclusion

Ce chapitre résume les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs et présente une classification des approches en plusieurs catégories principales : les protocoles hiérarchiques, les protocoles basés sur la localisation, les protocoles à plat...etc [4].

Les protocoles de routage pour les RSCFs sont nombreux avec un unique objectif : Assurer la délivrance des paquets collectés par les nœuds capteurs tout en parvenant à étendre la durée de vie du réseau. Nous avons vu aussi dans ce chapitre que les algorithmes de routage sont découpés en trois familles : les algorithmes de routage données centrales, hiérarchiques ou géographiques. Chaque protocole doit affronter de multiples défis et fournir des caractéristiques répondant au besoin du réseau

(énergie, sécurité, temps réel...). Parmi les protocoles existants on s'intéresse particulièrement à la classe des protocoles hiérarchiques. Dans le chapitre qui suit, nous énumérerons un état de l'art sur les protocoles hiérarchiques.

3

L'état de l'art : Quelques protocoles hiérarchiques récents

3.1 Introduction

Plusieurs solutions de routage hiérarchiques sont présentées dans la littérature. Chacune d'elle présente une technique différente pour minimiser la consommation de l'énergie sur l'ensemble du réseau. Néanmoins, les améliorations restent à apporter pour atteindre de meilleures performances. Dans ce qui suit, nous parlons sur quelques protocoles hiérarchiques récents.

3.2 Energy-Efficient Clustering Scheme to Prolong Sensor Network Lifetime (EECPNL)

EECPNL (Energy Efficient Clustering scheme to Prolong sensor Network Lifetime)[6] est proposé par B.Sethi, T.Pal et S.DasBit. Son principe est le même que LEACH [4] ; former les clusters-heads à base de l'énergie résiduelle des nœuds de capteurs en ajoutant le concept de head-list. Au lieu de considérer un nœud simple, un certain nombre de nœuds formant une Head-list est considéré comme CH pour le cluster à n'importe quel moment.

3.2.1 Fonctionnement du protocole

Le protocole comporte plusieurs rounds où chaque round a plusieurs itérations. Chaque itération a deux phases : la phase d'installation et la phase de diffusion de données. Le protocole EECPNL se compose de deux phases de fonctionnement :

- **Phase d'installation** : au début, les CHs sont choisis aléatoirement car tous les nœuds ont la même énergie. Dans le prochain round, ces CHs sont choisis selon leurs énergies résiduelles. Une fois que les clusters sont formés, la head-list respective de chaque cluster est créée. La head-list d'un cluster est créé contenant un nombre prédéterminé de nœuds prise du cluster. Les membres de la head-list sont sélectionnés en fonction de l'ordre décroissant de l'énergie résiduelle des nœuds.
- **Phase de diffusion de données** : une fois que les clusters et leur head-list respective sont formés, la transmission de données commence. L'ACH (pour Active Cluster Head) de chaque cluster prend la responsabilité d'agréger et de transmettre les données captées par les nœuds membres du cluster respectif à la station de base. Après un nombre fixé de transmission de données (une session de données), les ACHs courants seront en mode sommeil et des nouveaux ACHs seront élus parmi les membres de head-list de chaque cluster et participent à la session de transmission de données. De cette façon, que tous les membres de head-list deviennent ACH. Après l'achèvement d'une itération, la phase d'installation commence à nouveau. Un nouvel ensemble de clusters avec leurs head-lists sont formés suivant la phase d'installation. Les membres des head-lists existantes deviennent des nœuds membres des clusters. Une fois qu'un nœud membre est sélectionné comme membre d'une head-list dans une itération, le nœud ne sera jamais choisi en tant que membre de head-liste de n'importe quelle autre itération dans le même round. De cette façon, chaque membre de réseau devient ACH.

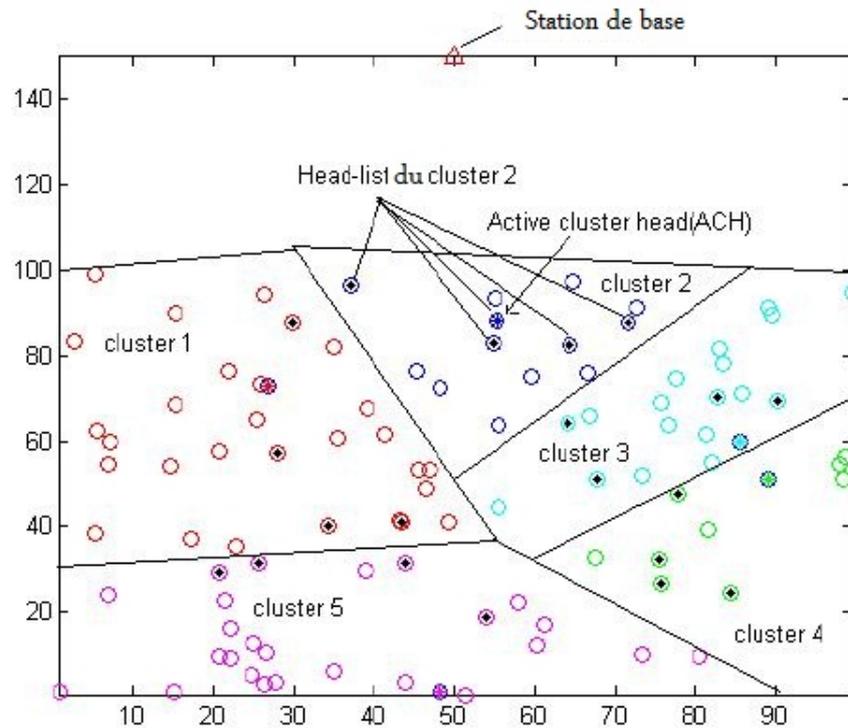


FIGURE 3.1 – Cluster head et head-list des différents clusters.

- Le problème est, qu'en pratique, il n'est pas possible d'envoyer directement les paquets à la station de base en un seul saut si les noeuds sont loins de la station de base. Ainsi, les clusters heads communiquent directement et envoient les données agrégées à la station de base ce qui provoque une perte considérée de leurs énergies.

3.3 Cluster based Multipath Routing Protocol

Dans [33] S.Sharma et S.Kumar Jenacet ont proposé un protocole de routage multi-chemins dénoté CMRP (Cluster based Multipath Routing Protocol), qui utilise les techniques de clustering et de multi-chemins pour réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la fiabilité. L'idée de base est de réduire la charge du nœud de capteur en donnant plus de responsabilités à la station de base.

CMRP est un protocole de routage proactif, dans lequel tous les chemins sont calculés au préalable. Cette approche est appropriée pour un réseau statique. La station de base est chargée de calculer le chemin de routage et la surveillance du niveau d'énergie de chaque nœud capteur dans le réseau.

3.3.1 Fonctionnement du protocole

Le protocole CMRP se compose de quatre phases : la découverte du voisinage et la construction de la topologie, la sélection des clusters heads et la formation des clusters, la diffusion des données, ainsi que le reclustering et le réacheminement des données.

- a) **Découverte des voisins et la construction de la topologie** : la station de base initialise la phase de découverte des voisins. Après le déploiement des nœuds capteurs, chaque nœud capteur diffusera le paquet Nbr DET une seule fois. A la fin de la phase de découverte des voisins, chaque nœud dispose de l'information au sujet de ses voisins. Après la phase de découverte des voisins, la phase de construction de la topologie commence. Dans cette phase, chaque nœud envoie ses informations du voisinage à la station de base. Pour cela, chaque nœud utilise la technique multidiffusion au lieu de l'inondation. Le nœud initiateur commence l'envoi des informations de voisinage à la station de base par le biais des nœuds intermédiaires, comme illustré sur la figure 3.2.

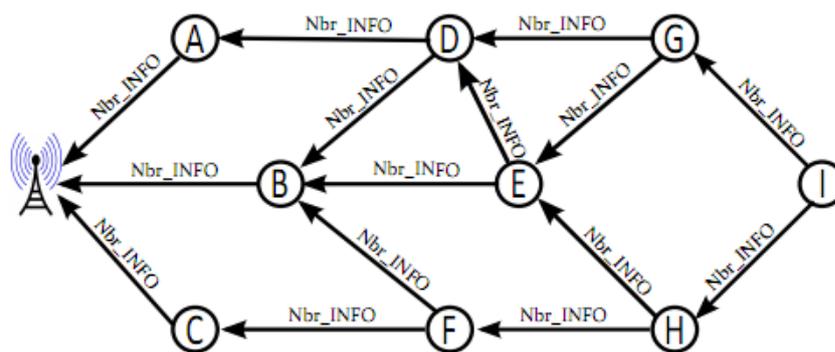


FIGURE 3.2 – Les nœuds envoient le paquet Nbr INFO à la station de base.

Le nœud émetteur choisit le nœud intermédiaire et transmet les informations à la station de base. Tout nœud capteur transmet le paquet NBR INFO seulement une fois pour n'importe quel nœud source afin d'éviter le bouclage dans le réseau. Pour ce faire, chaque nœud maintient une liste d'informations reçue. Par conséquent, il réduit le trafic dans le réseau et conserve l'énergie. La station de base crée la matrice d'adjacence lorsqu'elle reçoit le NBR INFO à partir des nœuds capteurs. La matrice d'adjacence montre la topologie du réseau et la connectivité des nœuds. La station de base sélectionne les clusters heads et les chemins de routage qui le sépare de chaque cluster Head du réseau.

- b) **La formation de clusters et la sélection de cluster-heads** : après la découverte des voisins et la construction de la topologie, la formation des clusters démarre. Initialement, tous les niveaux d'énergie des nœuds sont les mêmes. Après la formation de la matrice d'adjacence des voisins,

la station de base calcule et surveille l'énergie résiduelle de chaque noeud. La station de base choisit un certain nombre de clusters-heads dans le réseau en utilisant les conditions suivantes :

- (a) Deux clusters-heads ne soient pas voisins.
- (b) L'énergie résiduelle de chaque cluster head doit être supérieure à la valeur d'un seuil, ce dernier est égale à 40% de l'énergie initiale du noeud.
- (c) Chaque cluster-head doit avoir au moins un nombre k de noeuds comme voisins.

La sélection des clusters-heads dépend de deux facteurs indépendants ; l'un est l'énergie résiduelle (E_r) et l'autre qui est le degré du noeud (D), à savoir, le nombre de noeuds voisins. P_r est la probabilité qu'un noeud x devienne un cluster head.

Après avoir sélectionné le cluster head, la station de base détermine le chemin entre le cluster head et la station de base. La station de base se réfère à la matrice d'adjacence de voisins et assure les critères de sélection de chemin de routage suivants :

- L'énergie résiduelle du noeud capteur dans le chemin d'accès doit être supérieure à la valeur du seuil.
 - La consommation totale d'énergie du chemin de routage doit être minimisée.
- c) **Transmission de données** : les membres des clusters transmettent les données générées aux clusters heads dans un intervalle de temps donné, puis modifient le mode de fonctionnement en mode veille. Le noeud capteur se réveille au prochain intervalle de temps pour transmettre les données. De cette façon, le protocole permet au noeud capteur de conserver l'énergie. Le cluster head agrège les données et les envoie à la station de base à travers le chemin sélectionné. Tous les noeuds intermédiaires se réfèrent à la table de routage pour le noeud suivant à qui transmettre les données. Lorsque les données atteignent la station de base, un paquet accusé de réception est renvoyé au cluster head. Si le cluster head ne reçoit pas l'accusé de réception de la station de base, il retransmet ces données. La station de base surveille l'énergie résiduelle de chaque noeud dans le réseau car elle a toutes les informations concernant le réseau. Si la station de base trouve que l'énergie résiduelle d'un noeud est inférieure à la valeur du seuil, il sélectionne un autre chemin disponible.
- d) **Re-regroupement et réacheminement** : à ce stade, la station de base entame le processus de réacheminement et de reclustering. Pour équilibrer la charge entre les noeuds capteurs, la station de base surveille l'énergie résiduelle de chaque noeud capteur dans le réseau. Si l'énergie d'un noeud est inférieure à la valeur du seuil, il initie le reclustering ou le réacheminement basée sur le rôle du noeud. Si le noeud est intermédiaire, la station de base choisit un autre chemin disponible pour exclure ce noeud. Si le noeud est le cluster head, la station de base sélectionne un autre cluster head et le chemin correspondant. Cette méthode augmente la durée de vie du

réseau. Les nœuds ayant l'énergie résiduelle au-dessous du seuil, ne participent ni au routage ni ne deviennent un cluster head. Ils ne fonctionnent que comme membres de clusters.

- Concernant ce protocole, dans le cas où plusieurs clusters heads sont sélectionnés la topologie du réseau sera un peu compliquée et dans ce cas beaucoup de CHs seront voisins et cela rend le choix des clusters heads et le chemin de routage plus difficile.

3.4 Distributed Energy efficient Clustering-based Hierarchy Protocol

Dans [27], Mousaoui et Naimi ont proposé un nouveau algorithme de clustérisation dénoté DECHP (Distributed Energy Efficient Clustering-based Hierarchy Protocol). DECHP emploie, dans une première étape, cet algorithme de clustering pour (i)diviser le réseau de capteurs en clusters locaux, disjoints et équilibrés,(ii) élire un CH pour chacun des clusters, et (iii)créer un modèle de communication intra-cluster sans collision dans chaque cluster. Ainsi, DECHP réduit la complexité de routage en gérant localement la communication intra-cluster par le biais des CHs élus. Dans une deuxième étape, il établit des chemins de routage entre les CHs (CH-en-CH) en se basant sur la distance entre ces derniers ainsi que sur leurs réserves d'énergie afin d'effectuer la communication inter-cluster. DECHP permet d'optimiser la consommation d'énergie des capteurs en (i) équilibrant la taille des cluster, (ii) évitant la réélection périodique des CHs, (iii) plaçant uniformément les clusters à travers le RCSF, et (iv) distribuant la dissipation d'énergie sur l'ensemble des nœuds capteurs.

3.4.1 Fonctionnement du protocole :

Modèle du réseau

- Les nœuds capteurs sont quasiment stationnaires.
- Les nœuds ont la même capacité de capture, traitement, communication.
- Les nœuds utilisent une antenne omnidirectionnelle.
- La portée de capture d'un nœud est plus petite que la portée de communication.
- Les nœuds rendent compte de leur voisinage direct (1-saut) et sont capables de mesurer des distances par rapport à leurs voisins immédiats.

Formation des clusters

Se déroule en 3 étapes :

1. Former son propre groupe de voisinage

- Chaque capteur forme son propre groupe de voisinage.
- Transmettre un message d'exploitation.
- Attente d'un message d'acquiescement (ACK).
- La distance entre le nœud i et un autre nœud j $d(i,j)$ doit être inférieure à la portée de transmission.

2. Calculer la super classe de chaque nœud i

$$W_{EC} = \alpha||EC| - \mu| + \frac{2\beta}{(|EC|^2||EC|)} \sum_{k \in EC} d(j,k) + \gamma \sum \frac{1}{Ce(j)} \quad (3.1)$$

où :

α, β, γ : Poids.

$|EC|$: La taille de la classe équivalence EC.

μ : Le seuil prédéfini limitant le nombre des noeuds qu'un cluster head peut idéalement gérés.

$d(j,k)$: La distance entre deux noeuds j et k .

$Ce(j)$: Niveau d'énergie du noeud sélectionné.

La classe de poids minimal est la super classe du noeud i .

les composants qui interviennent dans la formation des clusters sont : la taille du cluster, la distance entre les nœuds et le niveau d'énergie de chaque nœud.

3. Construire des clusters heads : l'élection des CHs se fait selon la réserve d'énergie des nœuds.

- Dans ce protocole, le gain de performance augmente dans les réseaux denses. c-à-d dans le cas où il y'a un réseau de petite superficie, il y aura une diminution du gain, ainsi il souffre d'une grande perte de nœuds (beaucoup de nœuds capteurs qui vont quitter le réseau). Il y a également un risque de collision lors de la communication inter et intra-cluster au même temps.

3.5 Le protocole Fast Connection WAVEFont Extensible Routing

Dans [19], J. M Huang et C. J Chang ont proposé un nouveau protocole FC-WAFER (Fast Connection WAVEFont Extensible Routing). Ce dernier construit ses chemins de transmission par une connexion rapide des nœuds de capteurs aux CHs.

3.5.1 Fonctionnement du protocole

Dans le protocole **WAFER**, les SBs envoient un paquet de demande pour établir leurs chemins de routage hiérarchique. La portée d'émission sera considérée comme le rayon d'un cluster. Des nouveaux chefs de clusters du prochain niveau sont élus à chaque étape de transmission, et sont responsables de répandre le paquet de demande suivant le chemin. Les autres nœuds capteurs, qui ont également reçu le même paquet, les attachent automatiquement au créateur du message (c.-à-d. Cluster Head), et deviennent ainsi comme membres de cluster. Ce processus est répété jusqu'à ce que toute la structure de routage soit construite.

Pour éviter la formation d'un nombre élevé de clusters, excessivement recouverts les uns avec les autres, le protocole **WAFER** considère un ensemble de nœuds candidats d'être cluster head (CHCNs), selon les deux critères suivants. Le premier est l'énergie résiduelle du nœud. Puisque les clusters head sont responsables de collecter, fusionner et envoyer les données récoltées, leurs énergies seront rapidement épuisées par rapport aux membres du cluster. En conséquence, les CHCNs devraient être avec une énergie résiduelle supérieure à un RETV (Residual Energy Threshold Value) pour le traitement des tâches à venir. La valeur appropriée de RETV devrait être placée à une valeur de 40% de l'énergie initiale du nœud. Le deuxième critère est que les CHCNs doivent être placé dans la région de candidat de cluster head.

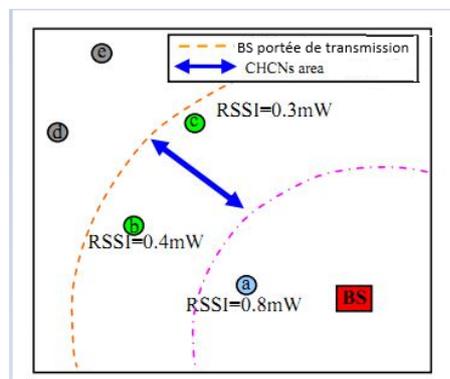


FIGURE 3.3 – La zone de CHCNs.

tous les CHCNs cherchent à devenir comme CHs du prochain niveau. Pour réduire le nombre élevé de clusters ils choisissent les CHs les plus proches de la frontière de la zone CHCA.

Le temps de retard d'attente peut être calculé comme suit :

$$DT = RSSI * k \quad (3.2)$$

Où k est un facteur de retard constant. Les nœuds candidats restants changent par la suite leurs rôles comme étant membres de cluster, et appartiennent à un CH spécifique. Par exemple, le nœud candidat "c" dans la figure 3.4 peut être un CH pour le prochain niveau, parce qu'il diffuse son prétendant paquet avant que le nœud "b" le fasse. Les autres nœuds désignés sous le nom des membres de cluster, et concerne finalement leurs CHs respectifs. Basé sur le modèle d'ondulation étendue, ce processus peut être répété jusqu'à ce que tous les nœuds capteurs soient examinés. Afin d'éviter le renvoi de paquet de construction de chemin à la SB, et formuler ainsi anormalement un chemin de routage inverse, le protocole WAFER empêche les nœuds configurés d'accepter les paquets de demande de construction de chemin qui ont été propagés des nœuds à niveau élevé.

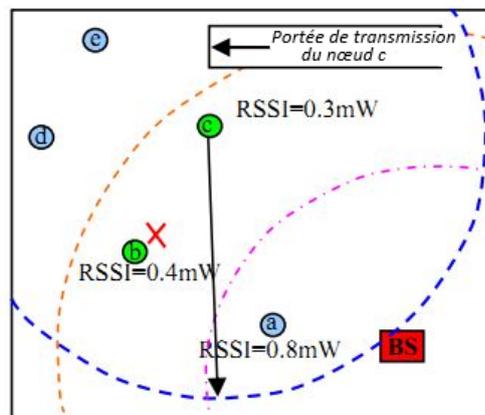


FIGURE 3.4 – Le nœud c agit en tant que nouveau cluster head après affirmation, et le nœud b désigné comme un nœud membre.

En fait, le nœud membre "b" (dans figure 3.4) peut recevoir deux messages ou plus de demande de construction de chemin respectivement envoyés par SB, le nœud "c", ou les autres nœuds. Il ne peut pas décider quel nœud sera son CH. Les nœuds membres dans le protocole *FC – WAFER* vont choisir le message du nœud d'origine à partir duquel le paquet de construction de chemin était d'abord reçu comme étant un cluster head. La figure 3.5 montre les deux premiers niveaux de l'architecture de routage de cluster construits par le protocole *FC – WAFER*. Les nœuds "a", "b" et "c" sont les

membres de cluster dans le premier niveau. Dans le deuxième niveau, le nœud "c" devient un CH après l'affirmation, et contient deux nœuds "d" et "e" comme membres de cluster.

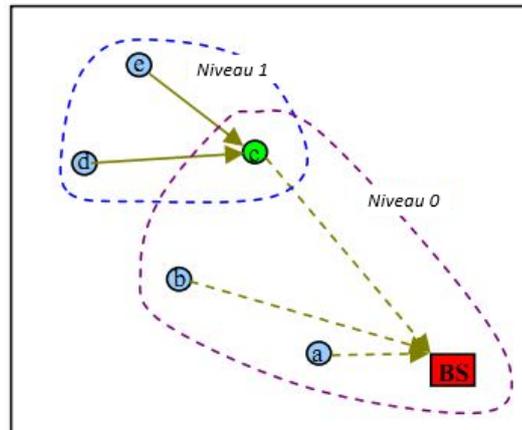


FIGURE 3.5 – Les deux premiers niveaux de l'architecture de cheminement constituée par le protocole de FC-WAFER.

- Dans le protocole FC-WAFER, nous notons que la taille du cluster (ou. la portée de transmission) et le déploiement aléatoire des nœuds capteurs influenceront sur le nombre des clusters de même niveau, la probabilité des nœuds isolés, et la dissipation d'énergie de transmission de données des membres des clusters.

Nous constatons également, un problème de regroupement des nœuds, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de connexion entre le cluster head et les nœuds isolés ainsi ils sont considérés comme étant des nœuds inutiles.

3.6 Multipath Ring Routing et Clustering pour les RCSFs

Dans [5], A.Pandya et M. Mehta ont proposé une nouvelle approche triphasée qui utilise la technique de clustering et routage multi-chemins rings. Les trois phases de ce protocole sont : (i) Phase d'installation de la topologie, (ii) Phase de formation de clusters et (iii) phase de diffusion de données.

3.6.1 Fonctionnement du protocole

Cette approche utilise trois phases, à savoir :

3.6.1.1 Phase d'installation de la topologie : l'idée fondamentale de la phase d'installation de la topologie est d'organiser le réseau selon la distance en nombre de sauts de chaque nœud par rapport à la station de base (SB) c.-à-d. à la fin de cette phase chaque nœud arrivera à savoir quel est le nombre de sauts, qui le sépare de la SB. La station de base commencera cette phase en diffusant le paquet d'installation de topologie par le numéro de ring courant régler à zéro. Le paramètre de numéro de ring est employé pour définir la distance en nombre de sauts. Les nœuds qui sont à proximité directe de la SB peuvent recevoir ce paquet d'installation de topologie. Lors de la réception de ce paquet, le nœud récepteur fixera son numéro de ring courant au numéro de ring du paquet reçu plus un et retransmettra le paquet avec son numéro de ring. Tous les nœuds qui sont voisins directs de la SB seront dans le ring **R1** et les voisins directs des nœuds dans **R1** seront dans **R2** et ainsi de suite. En général, si le nœud est loin de n sauts de la station de base le nœud appartiendra au ring **N**.

3.6.1.2 Phase de formation des clusters : une fois que la phase d'installation de la topologie est terminée alors la phase de formation de clusters commencera.

Dans cette phase, ce protocole forme des clusters de petite taille des nœuds qui sont dans le même ring. Pour former les clusters, les auteurs ont opté pour la même méthode utilisée dans LEACH [4].

3.6.1.3 Phase de diffusion de données : dans cette phase, chaque nœud envoie ses données au Cluster Head. Le cluster head du ring **Rn** envoie les données agrégées avec son numéro de ring courant n . Le nœud récepteur du **Rn-1** peut être soit membre de cluster ou Cluster Head. Si le nœud récepteur est un membre de cluster, alors il va regrouper ses propres données avec les données reçues et les envoyer au CH. Tandis que si le nœud récepteur est un CH, alors il regroupera les données reçues avec ses propres données et retransmettra au ring du niveau inférieur. Ce processus continuera jusqu'à ce que les données atteignent le ring **R2**.

A.Pandya et M.Mehta n'ont pas formé les clusters dans le ring **R1** en utilisant le protocole LEACH mais ils ont divisé les nœuds en deux groupes de β nœuds et $(1 - \beta)$ nœuds ou β est entre (0 et 1). Les Clusters Heads de **R2** vont envoyer leurs données aux β nœuds. Une fois que les β nœuds ont rassemblé les données de CHs de **R2**, les nœuds β envoient leurs données aux nœuds $(1 - \beta)$ aussi bien qu'à la SB. Une fois que les nœuds β ont fini la transmission, les nœuds $(1 - \beta)$ renvoient les données reçues des nœuds β .

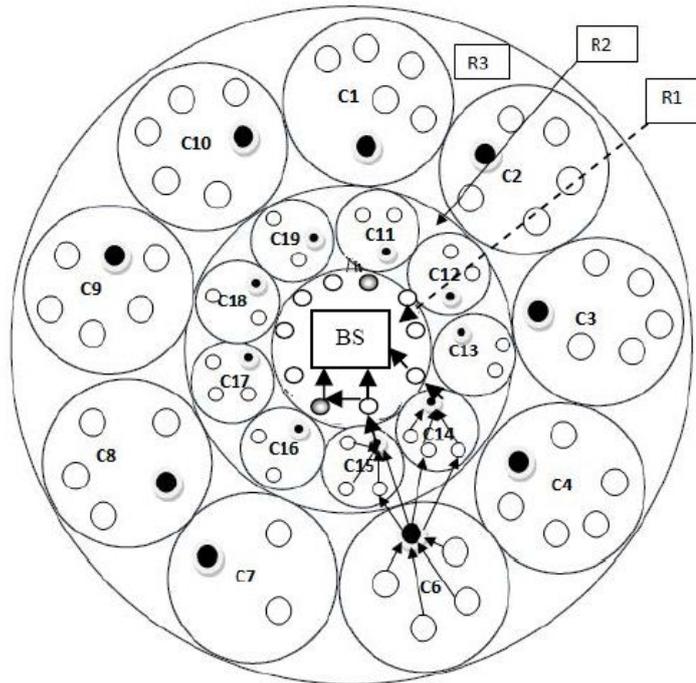


FIGURE 3.6 – Diffusion des données.

- Dans ce protocole, les membres du cluster perdent beaucoup d'énergie lors de la transmission dans les rings, alors au lieu d'envoyer les données vers les membres de cluster ceux de niveau inférieur feront directement un routage multi-chemins entre les clusters heads, c'est à dire le CH cherche dans l'ensemble de ses voisins de niveau inférieur un autre CH. S'il existe, il va envoyer les données sinon il cherche un noeud intermédiaire afin de réduire la consommation d'énergie durant cette phase.

3.7 Efficient Cluster Head Selection Scheme for Data Aggregation in Wireless Sensor Network

ECHSSDA [21] est un protocole de clustering permettant de réduire la surcharge du processus de regroupement, la charge des CH, et de réduire la consommation d'énergie dans les clusters à grande échelle et les réseaux de capteurs denses avec l'aide d'une approche qui consomme une quantité limitée d'énergie pour envoyer les données. Aussi, en évitant la phase d'installation de clusters et la phase de formation de clusters.

ECHSSDA fonctionne en deux phases à savoir : Cluster set-up phase (la phase d'installation) et cluster steady phase (la phase de formation de cluster) qui est la même que celle utilisée dans le

protocole LEACH.

3.7.1 Fonctionnement du protocole

Ce protocole propose une approche en niveaux. Chaque niveau commence avec une phase d'installation de clusters, suivie d'une phase de formation de clusters. Le CH sera chargé de recevoir des données des membres du cluster, agréger ces données et ensuite les l'envoyer à la SB.

1. **Phase d'installation des clusters** : dans la phase de formation des clusters, le Cluster Head est sélectionné, puis il forme un groupe. Après un certain temps l'énergie correspondante du Cluster Head va être réduite pour continuer le processus de sélection du CH. Dans le choix des clusters heads chaque nœud décide s'il sera Cluster Head ou pas. Certains nœuds avec plus d'énergie résiduelle se transforment en cluster head et envoient un paquet d'information pour informer les autres nœuds. Les autres nœuds avec moins d'énergie résiduelle se transforment en membres du cluster, et envoient des informations au cluster head pour rejoindre le cluster.

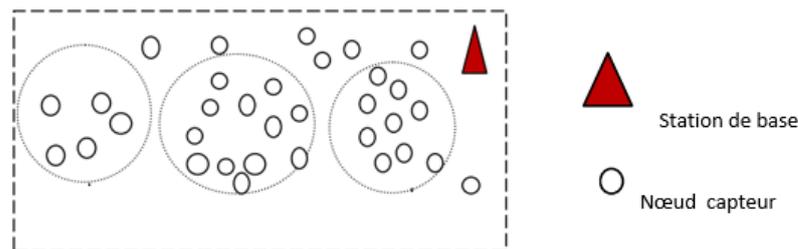


FIGURE 3.7 – Nœuds capteurs regroupés en clusters.

2. **Cluster Steady phase (phase formation des clusters)** : après que le cluster Head reçoive les données, ces dernières seront agrégées et peuvent être transmises à la station de base. Pendant la phase d'installation, chaque nœud capteur envoie des informations sur son endroit courant à la station de base. Afin de déterminer des bons clusters, la station de base doit s'assurer que la charge énergétique est répartie uniformément entre tous les nœuds capteurs. Les nœuds capteurs envoient leur niveau d'énergie à la station de base, la station de base compare le niveau de l'énergie résiduelle de chaque nœud à l'énergie moyenne et sélectionne les nœuds qui ont l'énergie la plus élevées par rapport à l'énergie moyenne. Les nœuds qui seront sélectionnés seront choisis comme clusters heads. Chaque CH diffuse alors un message d'offre au reste des nœuds, les nœuds non CH doivent garder leur récepteur lors de la phase d'installation pour entendre les diffusions de tous les nœuds CH. Après que cette phase soit terminée, chaque nœud non CH décide quel cluster auquel il appartiendra. Cette décision est basée sur l'intensité du signal reçu.

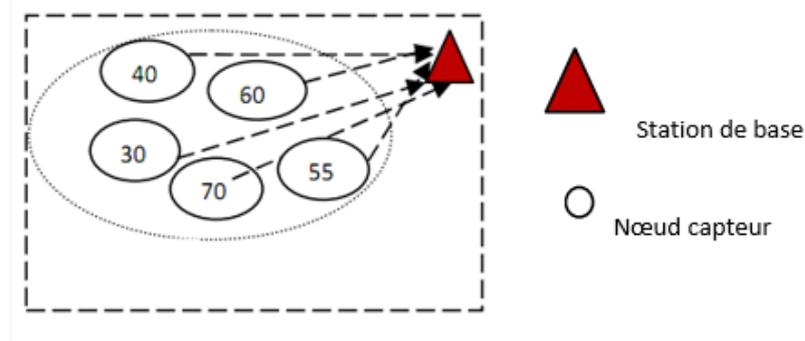


FIGURE 3.8 – Nœuds capteurs qui envoient leurs énergies à la station de base.

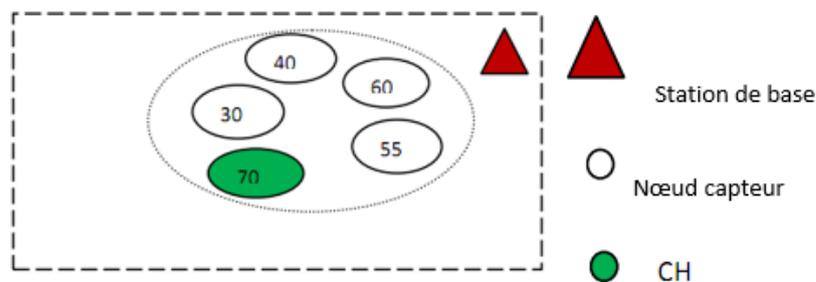


FIGURE 3.9 – Choix des nœuds ayant plus d'énergie comme CH.

Après que chaque nœud ait décidé à quel cluster il doit appartenir, il doit informer le nœud CH qu'il sera un membre du cluster. Chaque nœud transmet cette information au nouveau CH en utilisant le protocole CSMA. Pendant cette phase le CH reçoit tous les messages des nœuds qui veulent être inclus dans le cluster. Le CH crée un programme TDMA pour la transmission des données. Ce programme est diffusé aux nœuds du cluster. Une fois que les clusters sont créés et le programme de TDMA fixé, la transmission de données peut commencer. Les nœuds envoient pendant leur temps de transmission réservé au CH. Cette transmission utilise une quantité minimale d'énergie. La radio de chaque nœud non-CH peut être désactivée jusqu'au temps de diffusion réservé au nœud, pour minimiser la dissipation d'énergie de ces nœuds. Le CH doit garder son récepteur pour recevoir les données à partir des nœuds du cluster.

Lorsque toutes les données ont été reçues, le CH effectue l'agrégation de données. Ces données agrégées sont envoyées à la station de base, cette transmission consomme beaucoup d'énergie car la station de base est loin du CH. Après une certaine période l'énergie du cluster head va être réduite, en raison de l'opération de réception, envoi et traitement, alors si l'énergie du CH devient en dessous de celle d'un non cluster head cela signifie que le prochain tour devrait être traité.

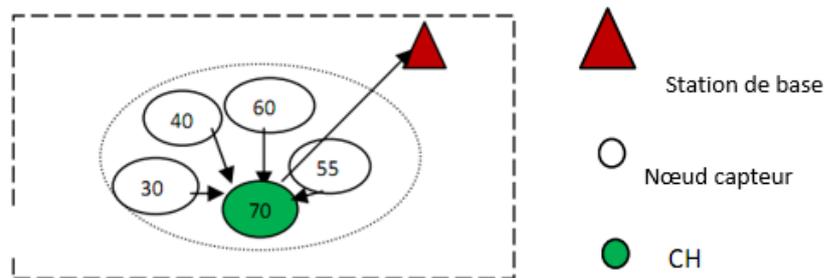


FIGURE 3.10 – Noeuds capteurs qui envoient des données au CH.

Au prochain tour, le cluster head associé est responsable d'agrégier et d'envoyer les données à la station de base, puisque sa valeur d'énergie résiduelle est supérieure à celle du CH.

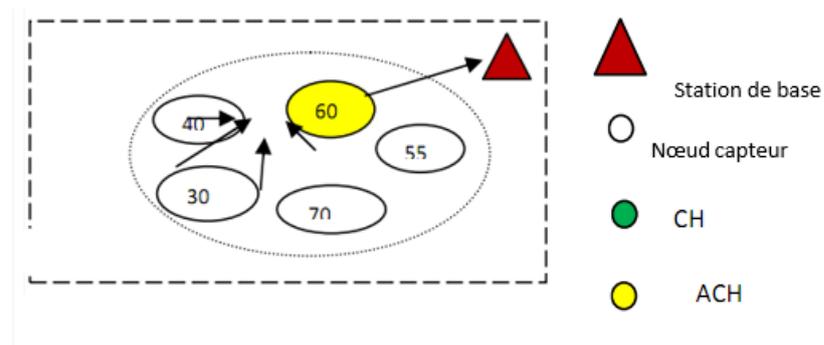


FIGURE 3.11 – Noeuds capteurs qui envoient des données à l'ACH lorsque l'énergie du CH est inférieure à celle de l'ACH.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques algorithmes de clustering qui combinent différents paramètres (la taille du cluster, la distance entre les noeuds et l'énergie des noeuds), pour organiser les noeuds capteurs en clusters.

L'avantage commun associé à ces processus est : le groupement des noeuds adjacents dans un même cluster qui permet de minimiser la consommation d'énergie.

Cette étude nous a permis de proposer un protocole qui utilise une méthode d'hybride de deux protocoles dans le but d'augmenter la durée de vie du réseau, ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique. Le prochain chapitre présente notre contribution.

4

Protocole proposé : Hybrid hierarchical protocol

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un protocole de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce dernier est basé sur une méthode hybride de deux protocoles : Distributed Energy Efficient Hierarchy Protocol (DECHP) [27] et Multipath Ring Routing Protocol Clustering. Le protocole proposé utilise la technique de clustering et la technique de multi-chemins pour optimiser la consommation d'énergie.

4.2 Modèles utilisés dans notre proposition

4.2.1 Modèle du réseau de capteurs

Nous considérons un modèle de réseau de capteurs sans fil composé d'un grand nombre de nœuds capteurs, lesquels sont déployés dans un champ d'application et d'une station de base (SB) située au centre du réseau, par laquelle l'utilisateur peut accéder aux données récoltées par les capteurs. Dans ce réseau, les tâches d'acquisition des données sont déclenchées périodiquement ou selon des

requêtes envoyées par la station de base.

Nous supposons que les nœuds sont quasiment stationnaires et qu'ils sont équipés d'une antenne omnidirectionnelle ayant un nombre fixe de niveaux de transmission. Nous supposons que les nœuds ont une réserve d'énergie limitée, mais la station de base n'a aucune contrainte d'énergie. Elle peut donc utiliser une puissance élevée pour communiquer directement avec tous les nœuds. Cependant, les nœuds ne peuvent pas toujours directement répondre à la station de base à cause de la contrainte d'énergie et de puissance de transmission, ayant donc pour résultat une communication asymétrique entre les capteurs et la station de base.

Le réseau est divisé en plusieurs rings, chaque ring forme ses propres clusters. Ces derniers se composent de nœuds qui sont capables de fonctionner en deux types, nœuds ordinaires et nœuds CHs. Un nœud ordinaire exécute la tâche d'acquisition des données, puis transmet les données récoltées au CH de son cluster. Le nœud cluster head rassemble les données détectées par les membres de son propre cluster, exécute la procédure de fusion de données, puis transmet les résultats à la station de base à travers d'autres CHs si ces derniers sont dans le voisinage du ring $(i - 1)$, $i > 2$, sinon à travers des nœuds intermédiaires.

4.2.2 Modèle de communication radio :

Un nœud capteur utilise son énergie pour réaliser trois tâches principales : L'acquisition, le traitement des données et la transmission (communication).

- Acquisition des données : l'énergie consommée pour effectuer l'acquisition des données est négligeable.
- Traitement des données : le traitement de données est infiniment moins coûteux que sa transmission. L'énergie consommée lors du traitement des données sera calculée en appliquant la formule : $E_{DA} = 5n_j/bit/signal$ [27].
- Communication : les opérations de transmission/réception des données consomment beaucoup plus d'énergie que les autres tâches. La figure ci-après présente un modèle d'antenne et des règles de consommation d'énergie associées.

Pour transmettre un message de K bits sur une distance de D mètres, l'émetteur consomme :
 $E_{TX}(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp}(d) * k$

$$E_{amp}(d) = \begin{cases} \epsilon_{FS} * d^2 & \text{si } d \leq d_o, \\ \epsilon_{TR} * d^4 & \text{si } d > d_o. \end{cases}$$

$$d_o = \sqrt{\epsilon_{FS}/\epsilon_{TR}}$$

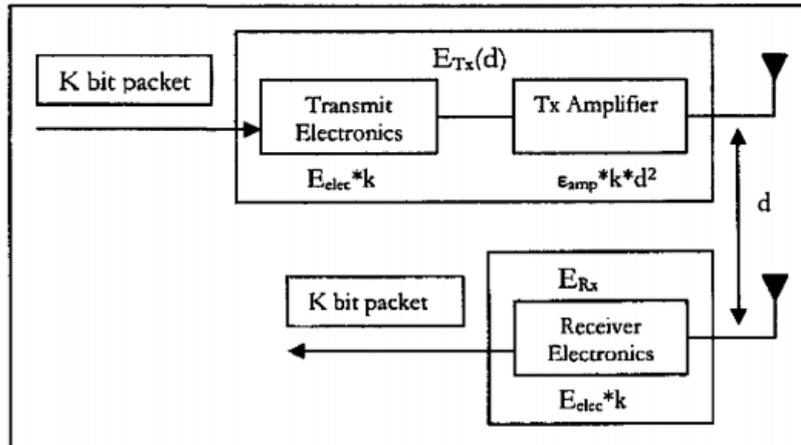


FIGURE 4.1 – Modèle d'antenne.

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

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k$$

où :

- E_{elec} : est l'énergie de transmission /réception électronique.
- k : est la taille du message.
- d : est la distance entre l'émetteur et le récepteur.
- d_0 : est la distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.
- $E_{amp}(d)$: est l'énergie d'amplification exigée pour maintenir un rapport signal/ bruit acceptable afin de transmettre des messages de données d'une manière sûre.
- ϵ_{FS} et ϵ_{TR} : sont respectivement les facteurs d'amplification correspondant au modèle " free space " et " two ray ".

Opération	Energie dissipée
Emeteur/récepteur électronique (E_{elec})	$50n j/bit$
Facteur d'amplification correspond au modèle free-space ϵ_{FS}	$10p j/bit/m^2$
Facteur d'amplification correspond au modèle two ray ϵ_{TR}	$0.0013p j/bit/m^4$
Traitement de données (E_{DA})	$5n j/bit/signal$

TABLE 4.1 – Caractéristiques d'antenne

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs des caractéristiques radio que nous allons utiliser dans la simulation.

4.3 Fonctionnement du protocole proposé

Ce protocole utilise trois phases qui sont :

4.3.1 Phase d'installation du réseau

L'idée est de savoir quel est le nombre de sauts qui sépare la station de base des nœuds afin de former des rings. La station de base envoie un paquet avec le numéro du ring fixé à zéro. Ce paramètre de numéro de ring va être utilisé afin de définir la distance en nombre de sauts qui sépare les nœuds de la SB. Les nœuds qui sont à la proximité de la station de base peuvent recevoir ce paquet, chaque nœud qui recevra ce paquet mettra le numéro du ring à une valeur égale au numéro du paquet du ring plus un et le retransmettra aux autres nœuds, alors que les nœuds qui sont à la proximité de vingt 20 mètres de la station de base seront les membres du ring numéro un (R1), les voisins des nœuds de R1 seront dans R2 ainsi de suite jusqu'au niveau i (R i).

4.3.2 Formation des clusters

Après l'installation de la topologie (les rings sont formés), la phase de formation des clusters aura lieu. La formation des clusters se fera en deux itérations :

1. **Auto-désignation des CHs** : Pour élire les CHs nous nous sommes inspiré de la métrique proposée dans [28]. Dans le premier round de transmission de données, chaque nœud génère

un slot de temps (T) définie comme suit :

$$T = \frac{1 - \alpha}{\beta}, \text{ tel que } \beta = \frac{d(S, SB)}{NH_{count}} \quad (4.1)$$

α : Nombre aléatoire entre (0,1),

$d(S, SB)$: Distance entre la source S et la station de base SB ,

β : Paramètre permettant de déterminer le nœud qui a le plus grand nombre de voisins avec la plus petite distance par rapport à la SB ,

NH_{count} : Nombres de nœuds voisins.

A partir de deuxième round, chaque nœud génère un slot de temps comme indiqué dans la formule si dessous, en concurrence pour être un CH.

$$T = \frac{1}{1 - q}, \quad P = \frac{E_{init} - E_{re}}{R_{num} - 1}, \quad (4.2)$$

$$q = \left(\frac{E_{init} - E_{re}}{E_{re}} \right) * \left(1 - \frac{P}{NH_{count}} \right) \quad (4.3)$$

E_{re} : L'énergie résiduelle,

E_{init} :L'énergie initiale,

R_{num} : Numéro du round, $R_{num} \geq 2$.

Dans le premier round, la distance par rapport à la station de base est considérée comme paramètre primaire, par contre à partir du deuxième round le paramètre utilisé est le coût de communication.

Le nœud qui va épuiser son slot de temps T va s'annoncer comme CH .

2. **Rattachement aux CHs** : quand un noeud décide de devenir un CH, il forme un nouveau cluster en diffusant un message d'invitation à ses voisins pour le rejoindre. Après la transmission

du message, un noeud choisit un CH selon deux facteurs de distance : $d(P_j, CH_i)$ et $d(CH_i, SB)$ afin de conserver sa propre énergie et aussi pour équilibrer la charge du CH [26].

La fonction pondérée $cost(j, i)$ est introduite pour le noeud ordinaire P_j pour prendre une décision, qui est :

$$Cost(j, i) = ((1 - w(P_j)) * f(P_j, CH_i) + w(P_j) \times g(CH_i)) \quad (4.4)$$

Le noeud P_j , rejoint le cluster qui a un coût minimal.

Où, f et g sont deux fonctions normalisées pour la distance $d(P_j, CH_i)$ et $d(CH_i, SB)$, respectivement :

$$f(P_j, CH_i) = \frac{d(P_j, CH_i)}{d_{f-max}} \quad (4.5)$$

$$g(CH_i) = \frac{d(CH_i, SB) - d_{g-min}}{(d_{g-max} - d_{g-min})} \quad (4.6)$$

$$d_{f-max} = \exp(\text{Max}[d(P_j, CH_i)])$$

$$d_{g-max} = \text{Max}[d(CH_i, SB)]$$

$$d_{g-min} = \text{Min}[d(CH_i, SB)]$$

W est une fonction de P_j définie comme suit :

$$W(P_j) = c + (1 - c) \sqrt{\left(\frac{d(P_j, SB)}{d_{g-max} - d_{g-min}} \right)} \quad (4.7)$$

Où :

C : Facteur de pondération de la fonction W qui dépend du nombre de sauts.

La fonction f garantit que les noeuds choisissent le CH le plus proche afin de minimiser le coût de la communication intra-cluster, tandis que la fonction g aide les noeuds à rejoindre le CH le plus proche de la station de base pour alléger la charge des CHs les plus loin de la SB. La valeur optimale du facteur de pondération c de la fonction W dépend de l'échelle spécifique du réseau qui est le nombre de rings.

Après la formation du cluster, chaque membre du cluster reçoit un slot TDMA (Time Division Multiple Accès) pour envoyer ses données à son CH. Cela évite la collision des messages de données et permet à chaque noeud non-CH d'éteindre sa radio de communication durant le temps de transmission afin d'économiser l'énergie.

4.3.3 Transmission des données

En commençant par le niveau supérieur R_i , chaque noeud du Ring i transmet ses données générées au cluster head du cluster auquel il appartient. Le cluster head du ring R_i qui detient les données à transmettre cherche un CH dans son voisinage dans le ring $i-1$. Si un tel voisin n'existe pas, il choisira un noeud intermédiaire pour transmettre ses données, avec son numero de ring, au CH de son cluster, ainsi de suite, jusqu'au ring R_2 .

Dans le ring R_1 il n'y a pas de formation de clusters. Les noeuds sont divisés en deux groupes de β noeuds et $(1 - \beta)$ noeuds. Nous génèrons un nombre α entre (0 et 1), chaque noeud du ring R_1 génère un nombre entre (0 et 1) et qui sera comparé avec α . S'il est inférieur à α le noeud appartient au groupe β sinon $(1 - \beta)$ noeuds. Les Clusters Heads de R_2 vont envoyer leurs données aux noeuds β . Une fois que les noeuds β ont rassemblé les données des CHs du R_2 , les noeuds β envoient leurs données aux noeuds $(1 - \beta)$ aussi bien qu'à la SB. Une fois que les noeuds β ont fini leur transmission, les noeuds $(1 - \beta)$ renvoient les données reçues des noeuds β . La figure suivante illustre la phase de transmission des données :

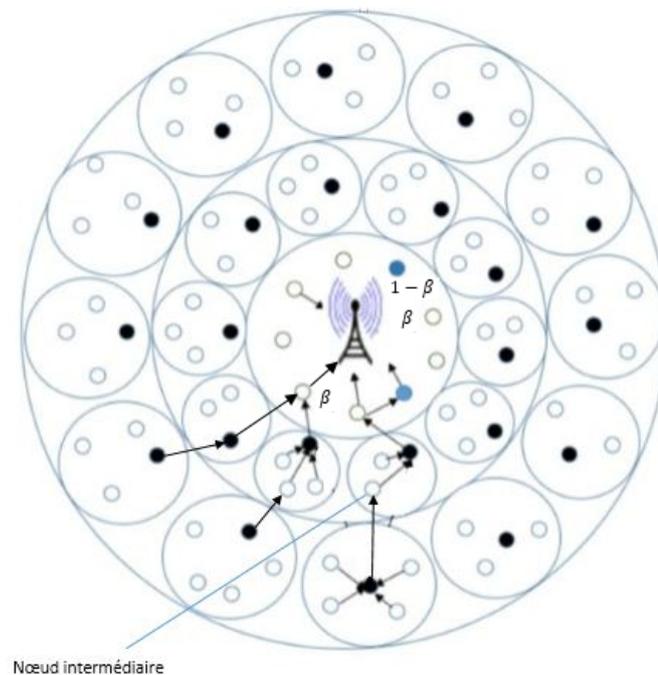


FIGURE 4.2 – Diffusion de données.

4.4 Evaluation des performances

Dans notre simulation, nous avons utilisé le logiciel de calcul numérique et programmation MATLAB (MATrix LABoratory) version 7.9.0.529.

Afin d'évaluer les performances de notre proposition, nous utilisons une simulation qui permet de simuler le comportement du réseau sans fil.

Par le biais de cette implémentation, nous comparons notre protocole proposé avec un protocole de routage hiérarchique basé sur le clustéring qui est DECHP décrit dans le chapitre précédent. Les performances sont mesurées par les deux métriques suivantes :

1. Noeuds vivants durant les rounds.
2. Paquets envoyés à la station de base.

En utilisant les paramètres suivants :

- . Nombre de rounds =5000.
- . Nombre de nœuds=100.

4.4.1 Modèle de simulation

Pour la simulation, nous avons créé dans un premier temps, une configuration aléatoire de RCSF, laquelle est composée de 100 noeuds qui sont dotés d'une réserve d'énergie initialisée à 5 joules, ces noeuds sont aussi déployés dans une zone de $100*100 m^2$ avec la station de base localisée au centre.

4.4.2 Environnement de simulation

Dans cette simulation, notre modèle d'expérimentation est établi sur 100 nœuds répartis aléatoirement sur une surface carrée de $100 * 100 m^2$ présentée par la figure 4.3.

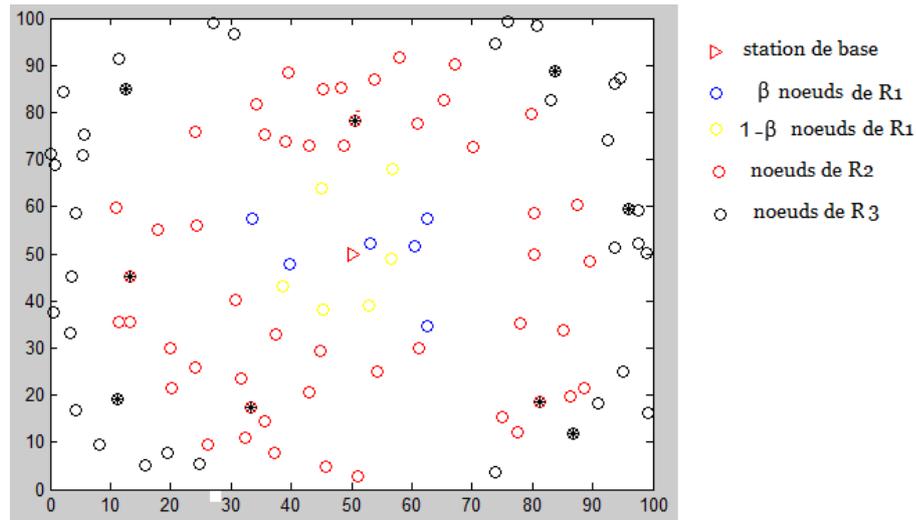


FIGURE 4.3 – Modèle d'expérimentation.

La figure 4.3 représente la topologie du réseau du protocole proposé tels que :

- Les β et $(1 - \beta)$ noeus sont à la proximité de la SB.
- Les rings sont bien répartis.
- Les clusters sont bien déployés dans chaque ring.

4.4.3 Résultats de simulation

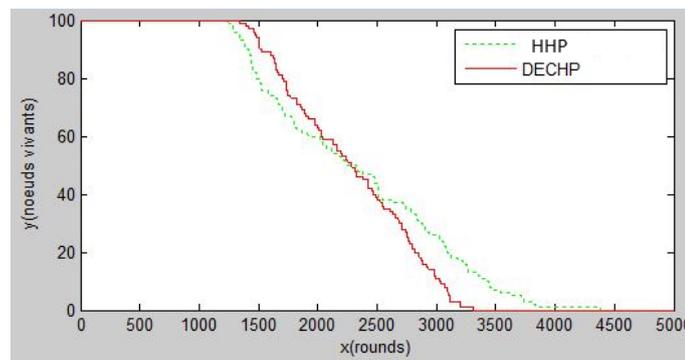


FIGURE 4.4 – Noeuds vivants durant les rounds.

La figure 4.4 illustre le nombre de noeuds survivants en fonction des rounds pour les deux algorithmes de routage : DECHP et le protocole proposé. On voit bien que :

- Avant 2255 rounds le protocole DECHP a une meilleure performances par rapport à notre protocole et ça à cause de la densité du réseau (100 noeuds dans une surface de $100 \times 100 m^2$) donne un gain supérieur au DECHP.

- Après 2255 rounds notre protocole a de meilleures performances que le DECHP, cela vient du fait que notre protocole divise la dissipation d'énergie entre les rings et les clusters heads, contrairement au DECHP qui divise cette dissipation seulement entre les clusters heads.
 - La communication entre les rings, nous permet de s'approcher vers la station de base sans déployer l'énergie additionnelle.
 - La communication inter-clusters, permet de diviser l'énergie dissipée entre les noeuds alors une augmentation de la durée de vie des noeuds.
- Ainsi, dans le protocole proposé, le nombre de noeuds qui communiquent avec le CH est considérablement réduit. Ceci implique une meilleure économie d'énergie et prolonge d'avantage le temps de vie des CHs.

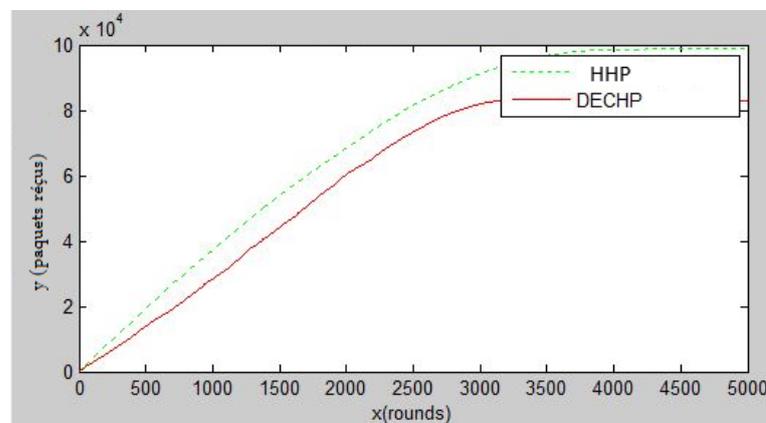


FIGURE 4.5 – La quantité des données reçues par la station de base.

A présent, nous analysons la quantité des données reçues par la station de base pour les deux protocoles étudiés. Dans cette étude, nous avons encore simulé la topologie du réseau où chaque noeud commence la communication avec un niveau d'énergie initialisé à 5 joules. La figure 4.5 montre le nombre de paquets de données reçues par la SB en fonction du nombre de rounds (X).

- Pour le protocole DECHP on voit la croissance de nombre de paquets reçus par la SB jusqu'au round numero 3250, et à partir de ce round nous remarquons une stabilité dans le graphe obtenu c'est à dire la SB arrête de recevoir les paquets cela signifie que tous les noeuds du réseau sont morts.
- Pour HHP(protocolé proposé), la stabilité du graphe commence à partir le round numéro 4400. Les résultats exposés dans cette figure illustre l'efficacité de notre protocole proposé en livrant un nombre plus élevé de message de données que son contrepartie et ça revient à la complexité réduite du réseau qui nous donne une bonne fiabilité à notre système. A partir de certain round dans les résultats nous pouvons deduire que le protocole proposé optimise la fiabilité du système.

4.5 Conclusion

Basés sur les résultats de la simulation, nous avons démontré qu'à partir d'un certain seuil qui est le nombre de rounds notre protocole améliore la dissipation d'énergie à l'intérieur des rings, augmente la fiabilité du système, et prolonge la durée de vie du réseau de 15% à 20% comparé au protocole DECHP.

Conclusion et perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil font partie des thèmes de recherche les plus actifs depuis quelques années en raison de leur large spectre d'applications. Dans le transport, ils servent à surveiller intelligemment la densité du trafic et les conditions routières. Dans le domaine militaire, ils peuvent être utiles pour le contrôle, le suivi et la surveillance des frontières. Les applications environnementales visent à surveiller, par exemple, la pollution atmosphérique, la qualité de l'eau, etc.

Les réseaux de capteurs sans fil se composent généralement d'un grand nombre de petits dispositifs, qui communiquent entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif. Ces dispositifs sont déployés aléatoirement dans une zone, ils sont généralement composé d'une unité d'alimentation, une unité de traitement, une unité de détection et une unité de communication. Toutefois, les réseaux de capteurs sans fil doivent faire face à d'importants défis de conception en raison de leurs capacités de calcul et de stockage limitées et surtout de leur dépendance à l'égard d'une énergie limitée fournie par une batterie. L'énergie est une ressource critique et constitue souvent un obstacle majeur au déploiement des réseaux de capteurs qui prétendent à l'omniprésence dans le monde de demain.

Dans ce mémoire, nous avons présenté les différentes solutions de routage existantes dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons focalisé, par la suite, notre étude sur la classe des protocoles de routage hiérarchique qui garantit une optimisation de la consommation en énergie. L'organisation du réseau de capteurs en groupe permet une distribution de la consommation de l'énergie sur le réseau et une spécification des tâches selon le type des nœuds (les CHs se chargent de la dissémination et de l'agrégation des données vers la station de base, alors que les autres nœuds se chargent de la collecte de données et la dissémination locale vers les CHs).

Pour augmenter la durée de vie de réseau, nous avons fait une hybridation de deux protocoles DECHP et MRRC qui adopte une organisation des nœuds du réseau en rings et regroupe les nœuds de chaque rings en clusters selon le coût de communication.

Ces affirmations sont vérifiées via une simulation effectuée sur MATLAB ; les résultats de ces simulations démontrent que le protocole proposé augmente la durée de vie du système en minimisant la consommation d'énergie. Cette consommation est distribuée équitablement entre les CHs et les rings ce qui nous donne une bonne fiabilité de transmission.

Enfin, comme perspectives de notre travail, nous envisageons d'améliorer les performances de notre protocole de routage. Ainsi, notre travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche à savoir :

- Etudier l'influence de la position de la station de base.
- Etudier le clustering dynamique (clustering après chaque itération, clustering après un certain nombre d'itérations, etc.).
- Examiner le cas de plusieurs stations de base.
- Examiner le cas d'une station de base mobile.
- Examiner le cas d'une station de base mobile se déplaçant vers les nœuds ayant un niveau d'énergie plus bas.

Bibliographie

- [1] K. Akkaya and M. Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3 :325–349, May 2005.
- [2] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. *wireless communications. IEEE*, Decembre 2004.
- [3] J.N. Al-Karaki and A. E. Kamel. Routing techniques in wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications*, 11 :6–28, Décembre 2004.
- [4] M. Ali and S. K. Ravula. Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks. Technical report, International Development Engineering 0805, January 2008.
- [5] A.Pandya and M.Mehta. A novel energy efficient routing approach using multipath ring routing and clustering for wsn. In *CUBE 2012 International Information Technology Conference and Exhibition*, 2012.
- [6] T. Pal B. Sathi and S. DasBit. An energy-efficient clustering scheme to prolong sensor network lifetime. In *Internatinal Conference and workchop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2010) – TCE, Mumbai India*, 2010.
- [7] R. Govindan C. Intanagonwiwat and D. Estrin. Directed diffusion : a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *Proceedings of ACM MobiCom'00, Boston, MA*, pp. 56-57, 2000., pages 56–57, 2000.
- [8] Y. Challal. Réseaux de capteurs sans fil. In *Syst ?mes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compi ?gne, France*, 17 Novembre 2008.
- [9] D. Estrin D. Culler and M.Srivastava. Guest editors' introduction overview of sensor networks. *Computer*, 37(8) :41–49, August 2004.
- [10] E.Dhib. Routage avec qos temps réel dans les réseaux de capteurs. Master's thesis, école supérieure de communication de Tunis, 2006/2007.
- [11] E.M.Royer and C.K.Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 6 :46–55, April 1999.

- [12] J. Champ et C Saad. Un nouvel algorithme de routage géographique dans les réseaux de capteurs. *Schedae*, 2 :95–103, 2007.
- [13] Y. Sankarasubramaniam F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38(4) :393–422, 2002.
- [14] Y. Sankarasubramaniam F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40 No 8 :102–114, August 2002.
- [15] A. Barros F. Brissaud, D. Charpentier and C. Bérenguer. Capteurs intelligents : Nouvelles technologies et nouvelles problématique pour la sureté de fonctionnement. *Http :// hal.archives-ouvertes.fr/ hal-00403106v1*, 1 :1–8, Octobre, 2008.
- [16] P. Kokate G. Jolly, M.C. Kusuç and M. Younis. A low-energy key management protocol for for wireless sensor network. *Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on computers and communication, (ISCC'03),IEEE COMPUTER SOCIETY*, 2003.
- [17] Y. Xu J. Heidemann and D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing. *n Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'01)*, 7 :70–84, July 2001.
- [18] K. Holgerand and A. Willig. Protocols and architectures for wireless sensor networks. *Wiley*, 2005.
- [19] J.M. Huang and C.J. Chang. Energy efficient wave-front routing protocols for wireless sensor networks. *5th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA 2008)*, pages 576–581, 2008.
- [20] W. R. Heinzelman J. Kulik and H. Balakrishnan. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless networks*, 8 :169–185, 2002.
- [21] K. Kant K. Maraiya and N. Gupta. Efficient cluster head selection scheme for data aggregation in wireless sensor network. *International Journal of Computer Applications*, 23– No.9 :10–18, June 2011.
- [22] R. Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 2009.
- [23] K.S.J. Pister L. Doherty and L. El Ghaoui. Convex position estimation in wireless sensor networks. *In Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 3 :1655–1663, 2001.
- [24] M. Lehsaini. *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique*. PhD thesis, Université A.B Tlemcen et Franche-Comté, 2009.
- [25] S. Lindsey and C.S. Raghavendra. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, 13 :924–935, September 2002.
- [26] X. Liu. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *in Sensors*, pages 1–41, August 2012.

- [27] O. Moussaoui. *Clustering-based hierarchical routing : ensuring QoS for multicast and sensor network applications*. PhD thesis, University of Cergy-Pontoise, 2006.
- [28] K. Adiyatham M.V. Kumaramangalam and C. Kandasamy. Zone-based routing protocol for wireless sensor networks. *International Scholarly Research Notices*, 2014 :1–9, November 2014.
- [29] J. Heidemann N. Bulusu and D. Estrin. Gps-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 7 :28–34, October 2000.
- [30] D. Niculescu. Topics in ad-hoc networks : Communication paradigms for sensor networks. *NEC Laboratories America, IEEE Communications Magazine*, Mars, 2005.
- [31] F. Zhao Q. Fang and L. Guibas. Lightweight sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation. *In Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2003)Annapolis, Maryland*, pages 165–176, June 2003.
- [32] R.Jurdak. *Wireless Ad hoc and sensor Networks : A Cross-Layer Design Perspective*. Springer, 2007.
- [33] S. Sharma and S.K. Jena. Cluster based multipath routing protocol for wireless sensor networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 45 N02 :14–20, April, 2015.
- [34] J. Heidemann W. Ye and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12 No 3 :493–506, 2004.
- [35] A. Chandrakasan W.R. Heinzelman and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, 2 :10, 2000.
- [36] D. Estrin Y. YU and R. Govindan. Geographical and energy-aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical report, UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-31-0023, Mai 2001.
- [37] Y. Younes. Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs. Master's thesis, Université M. M. TIZI-OUZOU, septembre 2012.
- [38] Y.Youcef. *Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de HAUTE ALSACE, 2010.

Résumé

Le réseau de capteurs sans fil (RCSF) est une technologie émergente qui vise à offrir des capacités innovantes. Leur utilisation ne devrait cesser d'augmenter et ceci dans de nombreux domaines qu'ils soient scientifiques, logistiques, militaires ou encore sanitaires. Cependant, la taille des capteurs constitue une limitation importante, principalement en terme d'autonomie d'énergie et donc de durée de vie car la batterie doit être très petite, c'est pourquoi de nombreux travaux portent aujourd'hui sur la gestion de l'énergie consommée par les capteurs dans un réseau en prenant en considération, en premier lieu, les communications et les algorithmes de routage des données. C'est dans ce but que nous avons proposé un algorithme de routage hiérarchique qui est une combinaison de deux approches de routage à savoir Distributed Energy Efficient Hierarchy Protocol (DECHP) et le protocole Multipath Ring Routing et Clustering. Afin de confirmer les améliorations apportées par notre algorithme nous avons conduit une simulation, dans laquelle les performances de notre algorithme sont évaluées et comparées avec le protocole DECHP utilisé dans les réseaux de capteurs.

Mots clés : Réseau de capteurs sans fil, fiabilité de système, LEACH, DECHP, approche basée cluster, multi-chemin.

Abstract

Wireless sensors network (WSN) is an emergent technology, which aims at offering innovating capacities. Their use should not cease increasing and this in many fields such as scientist, logistic, military or medical. One of the weaknesses of wireless sensors networks is the limit of energy, which affects network's lifetime. This is why many works concern today the energy management consumed by the sensors in a network while taking into account, initially, the communications and the data routing algorithms. It is to this end that we proposed a new routing approach, which is a combination of two great approaches of routing to Distributed Energy Efficient Hierarchy Protocol (DECHP) and Multipath Ring Routing et Clustering. In our proposal, nodes belonging to the same cluster form a chain where nodes communicate only with their closest neighbors, so that energy dissipation within clusters can be minimized and consequently, lifetime of the network can be improved. In order to confirm this assumption. Performances of the routing algorithm are evaluated and compared with the protocol (DECHP) used in the sensors networks.

Keywords : WSN, system reliability, LEACH, DECHP, Cluster based approach, multi-path.