

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

Université A/Mira de Béjaia

Faculté des Sciences Exactes

Département Informatique



Mémoire de Master Recherche

En Informatique

Option

Réseaux et Systèmes Distribués

THÈME

Le routage hiérarchique sous contrainte
d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Réalisé par :

M^r BERKANI Ferhat.

M^{lle} HAMMOUI Lamia.

Devant le jury composé de :

Président : M^r ABBACHE Bournane.

Promoteur : M^r MIR Foudil.

Examineur : M^r DJEBBARI Nabil

Examinatrice : M^{me} BOUTRID Samia.

PROMOTION 2014

Remerciements

Avant toutes choses, nous tenons à remercier Dieu le tout Puissant Qui nous a donné patience et persévérance pour achever notre travail.

Nous exprimons notre sincère gratitude à notre promoteur Mr F.MIR qui a toujours été présent pour nous avec ses conseils et sa ténacité sans lui n'aurions pas pu finalisés notre travail de recherche.

Nous remercions également, les membres de jury qui ont accepté d'examiner et juger ce modeste travail, nous sommes également reconnaissant vers toutes les personnes qui ont contribués à la réalisation de ce mémoire, sans oublier tous nos amis du département informatique.

BERKANI Ferhat et HAMMOUI Lamia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mes grands-pères,

A mes chères grands-mères,

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance,

A mes chères soeurs,

A mes tantes et mes oncles et leurs enfants,

A mes meilleurs amis et collègues

BERKANI Ferhat

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon grand-père,

A ma très chère Maman qui a toujours été là pour moi, et qui m'a encouragé durant toutes mes études,

A ma chère grand-mère,

A ma tante Ghénima,

A mon oncle,

A mes cousins et cousines

A tous mes ami(e)s

HAMMOUI Lamia

TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	i
Liste des tableaux	iv
Table des figures	v
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	1
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les réseaux mobiles (sans fil)	3
1.2.1 Les réseaux avec infrastructures (réseaux cellulaires)	4
1.2.2 Les réseaux sans infrastructures (réseaux ad hoc)	4
1.3 Définitions	6
1.3.1 Définition d'un capteur	6
1.3.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fils.	7
1.4 Architecture des réseaux de capteurs sans fil	7
1.4.1 Architecture d'un capteur	7
1.4.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil	8
1.4.3 Types de capteurs	9
1.5 Communication dans les réseaux de capteur sans fil	9
1.5.1 types de communications	9

1.5.2	La pile protocolaire	10
1.6	Défis des réseaux de capteur sans fil	11
1.7	Facteurs de conception des RCSFs	12
1.8	Les domaines d'applications des RCSFs	14
1.9	Comparaison entre les RCSFs et les réseaux ad hoc	15
1.10	Conclusion	16
2	Hiérarchisation, consommation d'énergie , minimisation	17
2.1	Introduction	17
2.2	Les défis de routage dans les RCSFs	17
2.3	Mécanismes de minimisation de la consommation de d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	20
2.4	Classification des protocoles de routages	20
	2.4.1 Selon la structure du réseau	21
	2.4.2 Selon l'initiateur de communication	26
	2.4.3 Selon le mode de fonctionnement du protocole	27
	2.4.4 Selon le mode d'établissement des chemins	31
2.5	Tableau comparatif pour les protocoles de routage à basse consommation éner- getique	33
2.6	Conclusion	33
3	Etat de l'art sur les protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs	34
3.1	Introduction	34
3.2	Définitions	34
3.3	Caractéristiques d'un protocole de routage hiérarchique	35
3.4	Les protocoles de routage hiérarchique	37
	3.4.1 LEACH-R (low-energy Adaptative Clustering Hierarchy with relai)	37
	3.4.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering Sensor Information System)	37
	3.4.3 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network)	38
	3.4.4 APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol).	39
	3.4.5 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)	40
	3.4.6 TLCP (Two-Level Cluster based Routing Protocol)	41
3.5	Tableau comparatif pour les protocoles de routage hiérarchiques étudiés	42
3.6	Conclusion	42

4 Contribution : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Levels Relay (LEACH-LR)	43
4.1 Introduction	43
4.2 Description de la contribution	44
4.2.1 Hypothèses	44
4.2.2 Fonctionnement de notre protocole	45
4.3 Simulation et analyse de performances	49
4.3.1 Le choix de MATLAB	49
4.3.2 Modèle de Propagation du signal Radio	49
4.3.3 Paramètres de simulation	51
4.3.4 Evaluation de performances	53
4.4 Conclusion	58
Conclusion Générale et Perspectives	59
Bibliographie	viii

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Synthèse des protocoles de routage efficace en énergie.	33
3.1	Classification des protocoles de routage hierachique présentés selon les paramètres de décision et les attributs de clustering.	42
4.1	Paramètres de simulation.	51

TABLE DES FIGURES

1.1	le réseau avec infrastructure (cellulaire).	4
1.2	Réseaux Ad Hoc.	5
1.3	Exemples de nœuds capteurs.	7
1.4	Anatomie d'un capteur .	8
1.5	Architecture d'un réseau de capteur sans fil .	9
1.6	Types de capteurs .	9
1.7	schéma de la pile protocolaire [12].	11
1.8	quelques domaines d'applications.	15
2.1	Diagramme de classification des protocoles de routages.	21
2.2	description des deux phases dans LEACH.	24
2.3	illustration du protocole GAF.	26
2.4	llustration du protocole directed diffusion.	28
2.5	illustration du protocole SPIN.	30
2.6	illustration du protocole AODV.	32
4.1	Illustration du protocole LEACH-R.	46
4.2	Architecture du protocole.	49
4.3	Modèle d'énergie utilisé.	50
4.4	Déploiement des nœuds.	52
4.5	Somme d'énergie des nœuds par round .	53
4.6	Nombre de nœuds en vie par round .	54
4.7	Comparaison de FND, HND, et Durée de vie du réseau .	54
4.8	La mort du premier capteur en fonction du nombre de nœuds .	55
4.9	La mort de 50 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds .	56

4.10 La mort de 75 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds	56
4.11 La mort de 100 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds	57

LISTE DES ABRÉVIATIONS

TEEN	T hreshold sensitive E nergy E fficient sensor N etwork protocol.
APTEEN	A daptatif T hreshold sensitive E nergy E fficient sensor N etwork protocol.
CAN	C onvertisseur A nalogique N umérique .
CH	C luster H ead.
CDMA	C arrier D evision M ultiple A ccess.
DNS	D nergy N ware S outing.
GAF	G eographic A daptive F idelity.
GPS	G lobal P ositioning S ystem.
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy.
MAC	M edium A ccess C ontrol.
MANET	M obile A d hoc N ETwork.
OSI	O pen S ystem I nterconnections.
BS	B ase S tation .
DVS	D ynamique V oltage S caling.
HEED	H ybrid E nergy E fficient D istributed C lustering
DD	D irected D iffusion.
SPIN	S ensors P rotocols for I nformation via N egotiation.
ADV	A D V ertise.
SAR	S equential A ssignement R outing.
QoS	Q ualité de S ervice.
TC	T opology C ontrol.
AODV	A d H oc O n- D emand D istance V ector.
TLCP	T wo - L evel C luster based routing P rotocol.

GEAR	G eographic and E nergy A ware R outing .
PDA	P ersonal D igital A ssistant .
PEGASIS	P ower-Efficient G Athering in S ensor I nformation S ystem .
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il.
RF	R adio F réquence.
RR	R umor R outing.
SAR	S equential A ssignement R outing .
SB	S tation de B ase .
SPIN	S ensor P rotocols for I nformation via N egotiation .
SMECN	S mall M inumum E nergy C ommunication N etwork.
SOP	S elf O rganizing P rotocol.
TDMA	T ime D evision M ultiple A ccess .
WSN	W ireless S ensor N etwork.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La technologie sans fil n'a cessé de croître depuis l'émergence des réseaux filaires jusqu'aux appareils mobiles qui ont favorisés le déploiement Ad hoc et ont offert à l'utilisateur la disponibilité de l'information à tout moment, ce qui a suscité les chercheurs à aller plus loin en élaborant des dispositifs de captage pour la surveillance des éléments dans l'environnement ou dans divers autres domaines c'est ce que on appelle les réseaux de capteurs sans fil (WSNs).

Ainsi les nœuds appelés capteurs sont déployés aléatoirement dans une zone géographique vaste dont le but est de collecter les données sur des événements bien précis et de les router à travers ces nœuds jusqu'à la station de base (nœud puits ou bien sink) sachant que cette dernière est un nœud particulier possédant des caractéristiques différentes des autres nœuds avec une énergie illimitée et elle se contente de fournir une connexion entre le réseau et l'utilisateur final, néanmoins la connectivité du réseau peut être influencée par un tas de facteurs tel que l'énergie qui joue un rôle crucial durant l'opération de routage de données et ceux à cause de la batterie des nœuds capteurs qui est irremplaçable voire même impossible à recharger.

Dans ce travail nous nous intéressons à concevoir un protocole de routage hiérarchique qui vise à minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, dans le but de garantir la transmission de données vers leur destinataire final ainsi prolonger la durée de vie du réseau. Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres et chaque chapitre est détaillé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons donner un bref aperçu sur les réseaux ad hoc puis nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, et leurs domaines d'applications. Nous discuterons également des principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil.

Dans le deuxième chapitre, nous allons décrire les défis de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, ainsi que quelques mécanismes de minimisation de consommation d'énergie. Dans la dernière partie de ce chapitre, les approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

sont discutées et une classification des protocoles conçus pour ce type de réseaux est ainsi présentée . Dans le troisième chapitre, nous donnerons quelques définitions, et quelques avantages du routage hiérarchique, puis nous passerons en revue quelques approches de routage hiérarchique dans les réseaux de capteur sans fil et finirons par une comparaison entre ces différentes approches.

Le quatrième chapitre est consacré à notre contribution dans la problématique de routage a basse consommation énergétique dans les réseaux de capteurs, dont la première partie est destinée à la description de notre proposition à travers les différentes phases qui la constituent après avoir discuté les approches que nous allons améliorer dans notre proposition.

Dans la deuxième partie nous allons réaliser une évaluation de performance de l'approche que nous avons proposée à travers l'analyse des résultats simulés avec MATLAB.

Enfin notre travail s'achève par une conclusion générale résumant l'essentiel de notre travail ainsi que nos perspectives de recherche pour nos travaux futur.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL (RCSF)

1.1 Introduction

Le déploiement des nouvelles technologies de communications sans fil a facilité aux usagers l'accès à l'information sans contrainte de temps ou d'espace, cela a favorisé l'apparition des téléphones cellulaires, ordinateur portable et PDA (personnel digital assistant) et a révolutionné l'architecture des réseaux sans fil. C'est dans ce contexte que les réseaux Ad hoc sont apparus. Connus pour leur facilité de mise en place, ne possédant pas d'infrastructure fixe les MANETS étaient utilisés au début pour des besoins militaires.

Toujours à la recherche d'une technologie sans fil encore plus efficace et laborieuse les chercheurs ne se sont pas arrêtés là. Effectivement ils ont mis au point des micro-composants qui intègrent des dispositifs de captage et de communication sans fil sur un circuit à dimension réduite et avec un coût raisonnable [1].

C'est à partir de ces composants appelés micro-capteurs, que les réseaux de capteurs sans fil en virent le jour. Dans ce chapitre nous allons établir un état de l'art sur les réseaux ad hoc puis faire une étude Globale sur les réseaux de capteur sans fil .

1.2 Les réseaux mobiles (sans fil)

Les réseaux mobiles s'attribuent le luxe de la flexibilité d'emploi, et nous évitent la mise en réseau d'un câblage trop coûteux. Ils se divisent en deux classes, les réseaux avec infrastructures et les réseaux sans infrastructures.

1.2.1 Les réseaux avec infrastructures (réseaux cellulaires)

La technologie cellulaire comprend deux ensembles d'entités les sites fixes et les sites mobiles, le type de liaison entre les sites fixes est filaires, elle est fiable avec haut débit alors que la liaison sans fil a une bande passante assez limitée qui réduit la taille des informations échangées. Les stations de base (SB) et les unités mobile (UM) s'échangent des messages via une liaison sans fil dans une zone géographique limitée appelé cellule, sachant que chaque cellule comprend une station de base et qu'une unité mobile n'est directement connectée qu'à une seule station de base. Et l'unité mobile peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée [2].

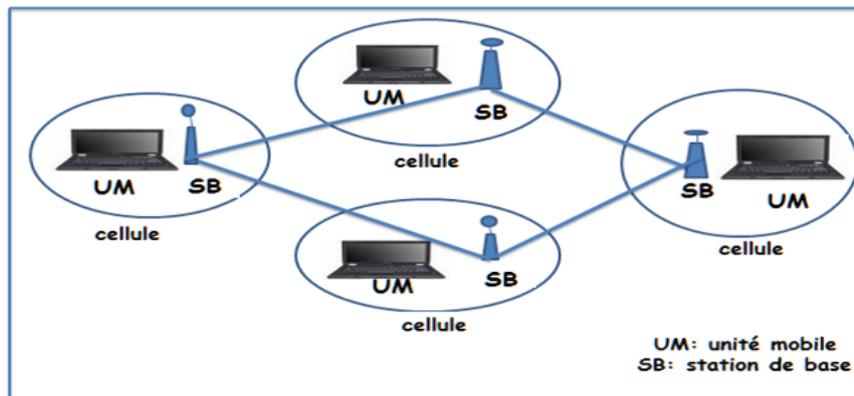


FIGURE 1.1 – le réseau avec infrastructure (cellulaire).

1.2.2 Les réseaux sans infrastructures (réseaux ad hoc)

Les MANETS (Mobile Ad hoc NETWORK) ne possèdent aucun site fixe ni de réseau filaire ou de station de base, c'est seulement un ensemble d'entités mobiles qui communiquent à travers un réseau sans fil sans aucune administration centralisée [3]. Sachant que les entités mobiles sont dynamiquement et arbitrairement éparpillées d'une manière où l'interconnexion peut changer à tout moment.

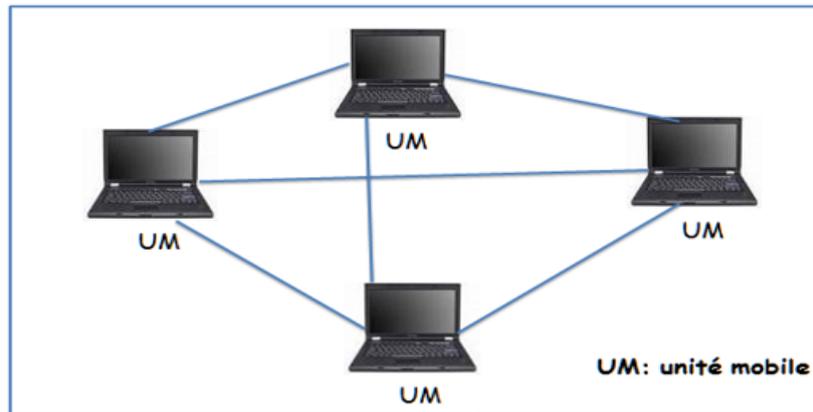


FIGURE 1.2 – Réseaux Ad Hoc.

1.2.2.1 Les domaines d'applications

La facilité de déploiement des réseaux ad hoc est l'un des facteurs qui a contribué à sa diversification dans différents domaines d'applications en distinguant les opérations tactiques comme les interventions militaires ou d'explorations.

On peut aussi les trouver dans les services d'urgence tel que les opérations de secourisme, ou lors des tremblements de terre par exemple, sans oublier les applications commerciales et un tas d'autres domaines.

1.2.2.2 Caractéristiques des réseaux ad hoc

Les caractéristiques des réseaux ad hoc sont très diversifiées et c'est ce qui fait de lui le plus préféré parmi les infrastructures existantes [4].

- **Topologie dynamique et auto-organisation**

Les unités mobiles du réseau se déplacent arbitrairement par conséquent la topologie du réseau peut changer à tout moment, c'est pour cela qu'un réseau ad hoc doit s'organiser automatiquement pour pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des unités mobiles.

- **La taille du réseau**

La taille du réseau est souvent petite ou moyenne qui peut atteindre des centaines de nœuds, mais le nombre de nœuds peut atteindre parfois des dizaines de milliers comme pour les réseaux de capteurs sans fil.

- **Absence d'infrastructure**

Chaque nœud travaille dans un environnement distribué et agit en tant que routeur pour relier la communication.

- **Les contraintes énergétiques**

Les entités mobiles sont alimentées par une source d'énergie autonome telle que la batterie qui a une durée de vie limitée en plus de la fonction de routage qui consomme beaucoup d'énergie.

- **Une bande passante limitée**

La communication sans fil utilise un médium de communication partagé qui réduit la taille de la bande passante réservée aux unités mobiles.

- **Une sécurité physique limitée**

La sécurité des réseaux ad hoc est constamment mise à l'épreuve c'est dû essentiellement aux protocoles de routage, à l'environnement sans fil et à la nature de ces réseaux.

- **Qualité de service**

C'est difficile d'offrir une bonne qualité de service à cause de la mobilité des nœuds.

1.3 Définitions

1.3.1 Définition d'un capteur

Un capteur (sensor) est un petit appareil autonome capable de transformer une grandeur physique observée (la température, pression, humidité) en une grandeur utilisable (l'intensité électrique, position d'un flotteur) [5].



FIGURE 1.3 – Exemples de nœuds capteurs.

1.3.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fils.

Un réseau de capteurs sans fils est constitué d'un ensemble de capteurs (senseurs) interconnectés via un lien sans fil (radio, infrarouge, optique), chaque capteur a pour fonctions de capturer, de mémoriser, de traiter et de communiquer les données acquises (capturées) vers une station de base [7].

1.4 Architecture des réseaux de capteurs sans fil

1.4.1 Architecture d'un capteur

Un capteur contient quatre unités de base : captage, traitement, communication, et énergie, Cependant des composants additionnels peuvent lui être attribués selon le domaine d'application, tels que : un générateur d'énergie, un système de localisation et un mobilisateur.

✓ Unité de capture (Sensing unit)

Elle permet de capter et de collecter des informations, elle est composée de deux sous unités D'un capteur, et d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) qui les transformes en signaux numériques et les transmet à l'unité de traitement [8].

✓ Unité de traitement (Processing unit)

L'unité de traitement comprend un processeur qui permet de stocker les données transmises par l'unité de capture dans la mémoire [9], l'unité de traitement exécute aussi les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds du réseau pour donner, en fin, le résultat de la tâche assignée au réseau.

✓ Unité de communication (Transceiver unit)

Elle est chargée d'assurer toutes les communications c'est-à-dire toutes émissions ou réceptions entre les différents nœuds du réseau via une liaison optique ou de type radio fréquence [9].

✓ Unité d'énergie (Power unit)

L'énergie est un élément crucial concernant la durée de vie du capteur et du réseau, donc cette unité est chargée de l'alimentation des différents composants du capteur par batterie et par d'autres ressources externes telles que les cellules solaires [10].

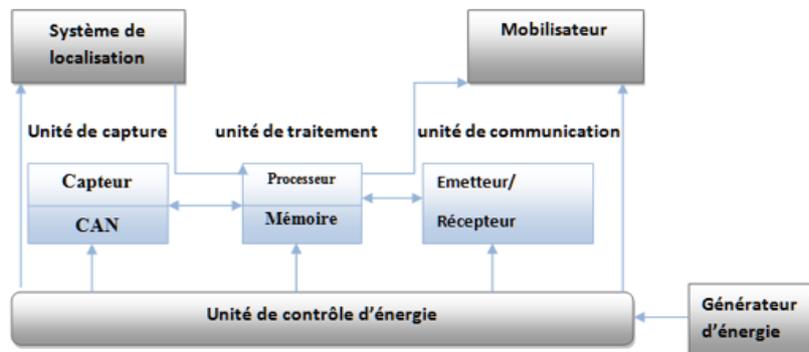


FIGURE 1.4 – Anatomie d'un capteur .

1.4.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

L'architecture d'un RCSF est généralement représentée par un nuage qui est en réalité un ensemble de capteurs éparpillés dans une zone géographique nommée zone de captage, sachant que chaque nœud a la capacité de collecter des données et de les router vers la station de base via une structure sans fil multi-sauts, et la station de base à son tour les transmet par satellite ou par internet vers l'utilisateur final pour analyser ces données et prendre des décisions. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau de capteurs [11].

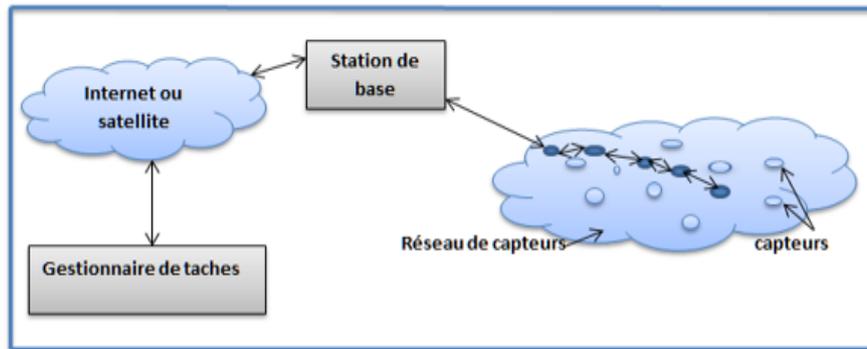


FIGURE 1.5 – Architecture d’un réseau de capteur sans fil .

1.4.3 Types de capteurs

Le tableau ci- dessous nous résume les quelques types de capteurs existants ,et leurs différentes propriétés

Nom du capteur	Mica2 Mote	MICA2dot Mote	Telos Platform
Image du capteur			
Informations sur le capteur	-Mote très connu sur le marché -contrôleur à 8 bits AVR -radio FSK -Mémoire flash des données en registrés	-Taille : 4 cm X 4 cm - CPU: 4 MHz, 8 bit -512 Bites RAM, 8KB ROM -Radio: 900 MHz, 19.2 Kbps, half-duplex -Capteurs : température, champ magnétique, pression, humidité, et force de signal (RF).	-Antenne intégrér (50m-125 m) - USB -IEEE 802.15.4 (CC2420 radio) -haute performance (10 kb de RAM, noyau de 16-bit) -standard IDC connecteurs.

FIGURE 1.6 – Types de capteurs

1.5 Communication dans les réseaux de capteur sans fil

1.5.1 types de communications

- La communication nœud capteur à un nœud capteur

Ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clustering ou le processus de création de route.

- **La communication nœud capteur à un nœud intermédiaire**

Les données capturées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.

1.5.2 La pile protocolaire

La pile de protocoles utilisée par la station de base ainsi que par tous les capteurs du réseau comprend 5 couches (une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique) qui ont les mêmes tâches que celles du modèle OSI, et 3 niveaux ou plans (Un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches)[10].

La couche application

Elle représente le niveau le plus proche de l'utilisateur, elle concerne toutes les applications implémentées dans un réseau de capteur sans fil, ces applications doivent permettre à l'utilisateur d'interagir avec les RCSF à travers les différentes interfaces.

La couche transport

Elle gère le flux de données c'est-à-dire tout ce qui concerne le transport de données, leur découpage en paquets, le contrôle de flux, la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des erreurs de transmission.

La couche réseau

Elle prend soin de router les données fournies par la couche transport avec optimisation de consommation énergétique.

La couche liaison de données

Le protocole MAC (Media Access Control) de la couche liaison assure la gestion de l'accès au support physique, elle est responsable du multiplexage du flux de données, elle assure une connexion fiable selon la topologie du réseau de capteur.

La couche physique

Elle assure la transmission et la réception des données au niveau bit, autrement dit elle est responsable de la sélection de la fréquence porteuse, de la détection du signal et de la modulation.

Un plan de gestion d'énergie

La durée de vie du nœud capteur est indépendante de celle de la batterie, le plan de gestion d'énergie doit faire attention à l'énergie par exemple après réception d'un message le nœud doit se mettre en sommeil pour éviter la duplication de message reçue.

Un plan de gestion de mobilité

L'un des caractéristiques d'un capteur est la mobilité, pour se localiser le plan de gestion de mobilité aide le capteur à enregistrer sa position.

Un plan de gestion des tâches

Le plan de gestion des tâches assure l'équilibrage de la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail efficace en matière de consommation d'énergie.

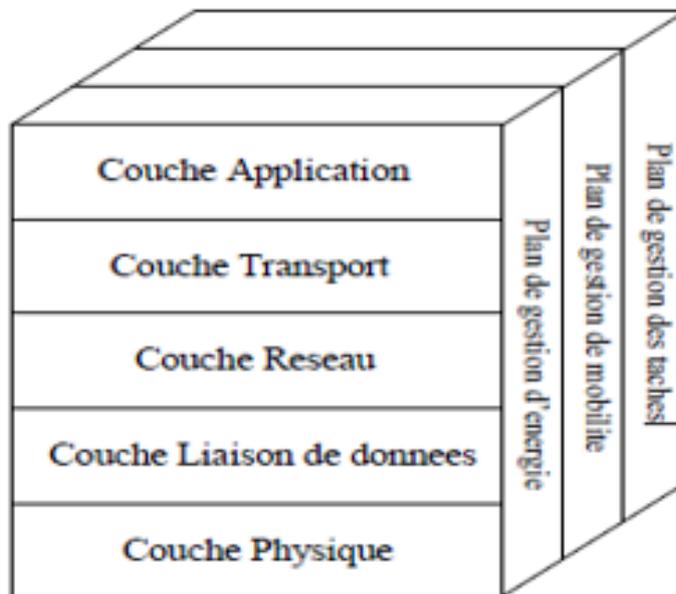


FIGURE 1.7 – schéma de la pile protocolaire [12].

1.6 Défis des réseaux de capteur sans fil

Les chercheurs ont prélevé plusieurs problématiques dans les réseaux de capteur sans fil Parmi les quels nous trouvons [17] :

1. Le routage

concevoir un protocole de routage efficace en consommation énergétique dépend de plusieurs facteurs tels que le choix des routes optimales pour l'acheminement des données d'un nœud capteur vers la station de base , de la réduction du délai de délivrance des paquets ,et un tas d'autres raison pour que le réseau assure un passage à l'échelle sans pour autant dégrader ses performances.

2. La qualité de service

les protocoles au niveau de la couche MAC doivent être capables d'établir des propriétés entre les flux, et réduire la perte des paquets potentielles a la bonne gestion du réseau.

3. La diffusion de l'information

les protocoles de diffusion doivent tenir compte de leurs contraintes et spécificités imposées pour ainsi concevoir un protocole efficace il faut prendre en considération une couverture maximale pour inclure tous les capteurs du réseau.

4. La sécurité

les applications qui nécessitent un niveau de sécurité élever tel que le domaine militaire des mécanismes doivent être installé telles que : l'authentification, la confidentialité et l'intégrité des données, ces mécanismes doivent tenir compte des ressources limités qui caractérisent ce réseau.

5. La couverture

La couverture joue un rôle très significatif dans les RCSFs dans la mesure où elle affecte le résultat de la tâche de perception effectué par un réseau, En exploitant la redondance des capteurs issue de la forte densité du réseau en utilisant l'ordonnancement d'activité afin d'avoir une surveillance totale d'une zone d'intérêt ce qui peut ainsi réduire la consommation énergétique.

1.7 Facteurs de conception des RCSFs

La conception d'un réseau de capteur sans fil engendres beaucoup de contraintes :

◇ La tolérance aux pannes

le blocage ou la défaillance d'un nœud du réseau de capteur sans fil est souvent provoqué par plusieurs causes telleque le manque d'alimentation électrique, de dommages physiques, d'interférence environnementale ou des problèmes liés aux logiciels. Mais tous ces problèmes ne devraient pas affecter le reste du réseau c'est ça le principe de la tolérance au panne [13].

◇ Le passage à l'échelle (scalabilité)

Les réseaux de capteur sans fil peuvent contenir des milliers de nœuds capteurs et cela dépend de l'application, par conséquent, les protocoles développés pour ces réseaux devraient gérer ce grand nombre efficacement [13].

◇ Le cout de production

Le cout d'un simple nœud est important pour la mise en point du coup globale du réseau Si le coup du réseau de capteur sans fil est plus cher qu'un réseau classique alors cette nouvelle technologie ne serait pas rentable en conséquence, le cout de chaque nœud doit être le plus bas possible, par exemple le prix d'un seul capteur ne doit pas atteindre 1\$ [14].

◇ Environnement

Les RCSF sont souvent déployés dans des milieux hostiles, par conséquent ils doivent être conçus d'une manière à résister aux sévères conditions de l'environnement.

◇ Media de transmission

Les nœuds communiquent entre eux via une liaison sans fil, ce signal est réalisé par radio, infrarouge, ou par media optique [13].

◇ La consommation énergétique

La source d'énergie des nœuds capteurs est limitée (<0.5 Ah, 1.2V), la durée de vie d'un capteur dépend de la durée de vie de la batterie, pour cela il est des fois difficile de fournir De l'énergie pour certain scénario d'application.

En plus du changement de topologie du réseau et sa réorganisation rendent la gestion d'énergie importante, cette énergie est consommé par les différent unités du capteur [14].

◇ Agrégation de données

Les informations collectés par les nœuds capteurs voisins sont tres reliés dans le temp et l'espace ceci peut provoquer la reception d'informations redandantes pour la station de base.

Reduire le nombre d'information redandante transmise par les capteurs permet d'ameliorer la durée de vie du reseau et la methode utilisée est celle de l'agrégation de donnés [9].

◇ Dimension

La taille infimes des capteurs permet le deploiment flexible du reseau ,mais la puissance de la batterie utilisés pour alimentés les capteurs est limité [13] .

◇ Puissance de calcul

Les processeurs des RCSF sont differents de ceux d'une machine classique car ils utilisent des microcontrolleurs a faible fréquence[13].

1.8 Les domaines d'applications des RCSFs

La large gamme de types de capteur, leur taille réduite, et leur coût de plus en plus faible Sans oublier le support sans fil utilisé, ont favorisé le déploiement des RCSF dans les différents domaines d'applications.

1. Applications militaires

Les RCSF ont joué un rôle crucial et décisif pour les applications militaires comme par exemple lors de la gestion des forces, des équipements et des armes, il s'agit là de capteurs minuscules qui leur sont attachés pour permettre la surveillance permanente par le chef des troupes.

Les RCSF sont aussi utilisés pour la surveillance dans les champs de bataille afin de fournir des renseignements concernant l'état d'avancement des forces ennemi c'est-à-dire tout ce qui concerne leurs emplacements, leur nombre, leurs mouvements, et l'identité des soldats et des véhicules [15].

2. Applications environnementales

Les RCSF touchent aussi le domaine de l'agriculture, grâce à leur habilité à surveiller les taux de pesticides dans l'eau potable, le degré d'érosion du sol et le niveau de pollution de l'air en temps réel, les capteurs sont aussi utilisés pour la surveillance géophysique et l'exploration planétaire comme la surveillance des activités sismiques, ou pour l'exploration et la surveillance dans les environnements hostiles comme les volcans et les régions toxiques [1].

3. Applications médicales

Le domaine médical lui aussi bénéficie de cette technologie qui est surtout utilisée pour la surveillance des données physiologiques comme la température du corps, la tension artérielle, la quantité de sucre dans le sang, et les pulsations cardiaques toutes ces données sont transmises à un ordinateur et évaluées par un médecin pour l'exploration et le contrôle médical ou bien pour la surveillance.

Actuellement, des micro-caméras qui peuvent être avalées existent. Elles sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures.

Dernièrement, des chercheurs ont présenté un projet qui consiste en la création d'une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue [16].

4. Applications industrielles

Les réseaux de capteurs sont largement utilisés dans les différents domaines de l'industrie Comme par exemple assurer la Sécurité dans Les grandes usines sachant qu'elles sont équipées

d'appareils complexes qui manipulent des produits chimiques souvent toxiques, où la moindre erreur conduira à une catastrophe, dans cet environnement les RCSF jouent un rôle très important pour détecter ce genre d'incidents et intervenir immédiatement [6].

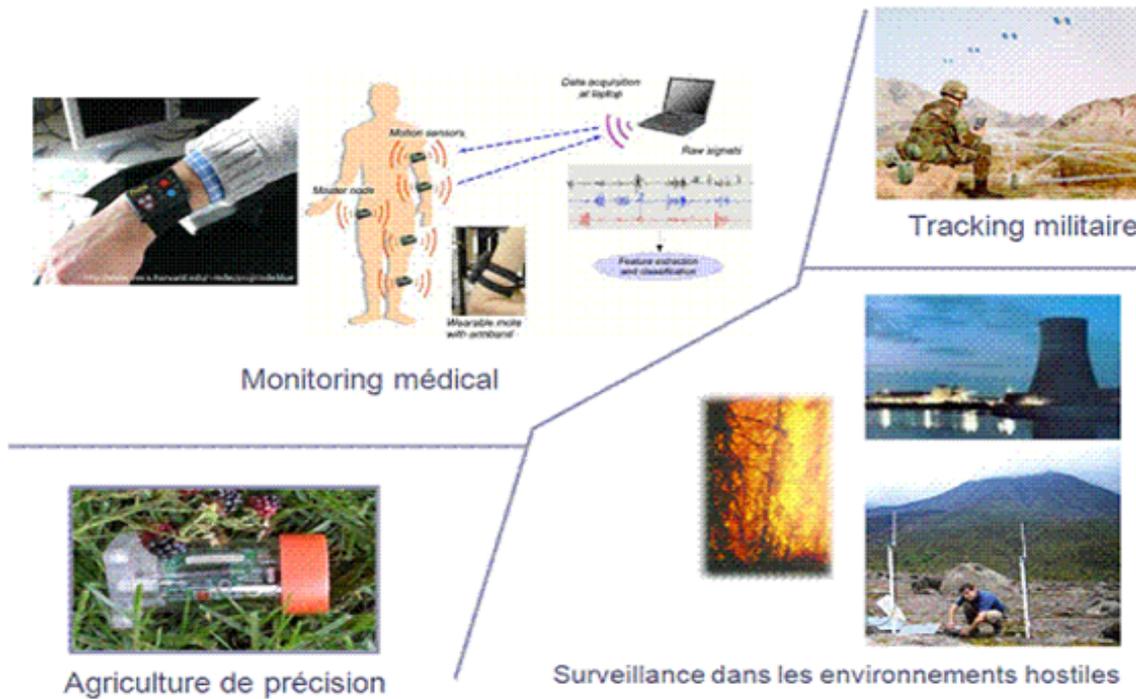


FIGURE 1.8 – quelques domaines d'applications.

1.9 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux ad hoc

Nous avons déjà cités avant que les RCSFs constituent un cas particulier des réseaux Ad hoc, pour ainsi dire que les deux catégories ne sont pas finalement si différentes, elles ont des ressemblances et aussi des différences.

Les points communs

Utilisation d'un médium sans fil.

Déploiements Ad hoc.

Robuste aux pannes des nœuds (Auto-Organisation).

Routage multi-sauts.

Les différences

La mobilité des nœuds est restreinte chez les réseaux de capteurs, alors que chez les Ad hoc elle est très grande.

Le nombre de nœuds dans les RCSFs est beaucoup plus grand que chez les réseaux ad hoc. Chez les capteurs les petits nœuds sont plus susceptibles de tomber en pannes, avec moins de capacité de traitements et de stockage alors que les nœuds dans les réseaux ad hoc ont plus de capacité de traitements et de stockage.

Souvent Les capteurs n'ont pas d'adresses uniques, les requêtes sont envoyé à tous les nœuds (Data-centric), alors que les réseaux ad hoc se caractérise d'une adresse unique pour chaque nœud utilisée pour réaliser la communication entre les nœuds (Adress centric).

1.10 Conclusion

Les réseaux de capteur sans fil ont révolutionné le monde de l'électronique et de la télécommunication, cette nouvelle technologie suscite un intérêt considérable étant donné son utilité et diversité dans les différents domaines de travail. Dans ce chapitre nous avons donné un bref aperçu sur les réseaux Ad Hoc et passer en revue les différents aspects des réseaux de capteurs sans fil, tel que l'architecture, la communication, les facteurs de conception des RCSFs ainsi que les différents domaines d'applications. Dans le prochain chapitre nous nous intéresserons au routage dans les RCSFs.

CHAPITRE 2

HIÉRARCHISATION, CONSOMMATION D'ÉNERGIE , MINIMISATION

2.1 Introduction

Le routage est une méthode d'acheminement d'informations depuis les nœuds sources vers une destination donnée (la station de base) dans un réseau de connexion. Dans le but d'assurer la connectivité du réseau, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination directement ; tout nœud joue ainsi le rôle de poste de travail et de routeur.

Et précisément dans les réseaux de capteurs sans fil le routage est reconnu comme un domaine de recherche très actif vu les spécificités de ce type de réseau, où la consommation d'énergie est considérée comme le défi majeur des protocoles de routage.

Dans ce chapitre nous allons mettre en évidence quelques défis de routages dans les réseaux de capteurs sans fil, par la suite, nous allons voir quelques techniques de minimisation de la consommation d'énergie et aborder les différentes approches de routage dans les RCSFs.

2.2 Les défis de routage dans les RCSFs

- **Le déploiement des capteurs**

Suivant le type d'application, le mode de déploiement des capteurs peut être déterministe ou aléatoire. Dans le déploiement déterministe, les capteurs sont placés manuellement et les données sont toujours acheminées via une route prédéterminée et fixe. Cependant, si le déploiement

est aléatoire, dit aussi auto-organiser, les nœuds capteurs sont dispersés aléatoirement, créant ainsi une infrastructure ad hoc. Dans ce cas, si la distribution qui en résulte n'est pas uniforme, le recours à une architecture de groupe optimale s'avère nécessaire afin de permettre une meilleure connectivité, ainsi que des opérations plus efficaces en consommation d'énergie. [1].

- **Agrégation de données**

Les nœuds capteurs peuvent produire des données significatives et superflues, les paquets semblables des différents nœuds peuvent être agrégés de sorte que le nombre de transmissions soit réduit. Cette technique a été employée pour optimiser la consommation d'énergie lors de transfert des données dans un certain nombre de protocoles de routage [24].

- **Dynamisme du réseau**

La dynamique du réseau concerne les cas mobiles et stationnaires des nœuds capteurs. Généralement, la plupart des architectures dans les protocoles de routage supposent que les capteurs sont stationnaires, utilisés pour des applications de surveillance de l'environnement pour la prévention contre les incendies. Des applications comme celle-ci travaillent avec un mode réactif et génèrent un trafic relativement faible. Par contre le réseau est dynamique si il y a au moins un composant mobile parmi (le nœud capteur, le nœud destinataire, phénomène capté), ce genre de réseau est utilisé pour les applications de détection et traque de cibles. Des applications comme celle-ci nécessitent l'envoi de rapports périodiques et acheminent un trafic considérable vers la station de base [25].

- **Hétérogénéité des nœuds/liens**

La plupart des chercheurs supposent que tous les nœuds sont homogènes et ont la même capacité en termes de calcul, de stockage et de ressources énergétiques. Cependant les nœuds capteurs peuvent avoir des rôles différents tel que le captage, le relayage avec un autre réseau sans oublier l'agrégation de données, et peuvent avoir ainsi, des capacités spécifiques. Par exemple, dans certains protocoles proposés dans la littérature, ils exigent qu'un Cluster head doit être plus puissant que les capteurs normaux en terme d'énergie, bande passante et mémoire. Dans ce cas, le Cluster head est le seul responsable de l'agrégation et la transmission des données captées vers la station de base.

L'existence d'ensembles hétérogènes soulève ainsi beaucoup de questions techniques liées au routage. En effet, certaines applications peuvent nécessiter une mixture diverse de capteurs qui surveillent la température, l'humidité, et la pression dans l'environnement, ce qui peut se réaliser avec des taux différents, sujet à des contraintes de qualité de service différentes, et suivant des modèles de livraison de données différents. Ce Qui rend l'opération de routage encore plus pénible [1].

- **La qualité de service**

Certaines applications exigent que les données captées soient immédiatement acheminées et transmises au nœud destinataire durant un délai de temps bien précis, autrement, ces informations ne seront plus utiles, Par conséquent, la garantie d'une latence (le destinataire doit pouvoir disposer de l'information dans un délai borné a priori connu limitée) dans les délais de transmission de bout en bout constitue une contrainte supplémentaire pour ce genre d'applications. Ceci dit, le réseau peut parfois être dans l'obligation de réduire la qualité des résultats en vue de minimiser la dissipation d'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau, toutes fois, les protocoles de routage doivent être en mesure d'assurer l'efficacité énergétique tout en gardant la qualité de service [1].

- **La consommation d'énergie**

Les nœuds capteurs peuvent utiliser leurs réserves d'énergie pour calculer et transmettre l'information dans un environnement sans fil, ainsi lors de l'opération de calcul et de communication, les techniques de conservation d'énergie sont nécessaires. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud joue le rôle d'expéditeur et de routeur de données. Le mal-fonctionnement de quelques nœuds capteurs dû à la défaillance (à cause de la diminution totale d'énergie) peut causer des changements topologiques cruciaux et peut exiger le déplacement de paquets ainsi que la réorganisation du réseau [26].

- **Modèle de livraison de données**

Ce facteur définit la manière dont les données captées sont transmises à travers le réseau. Le modèle de transmission de données peut être classé dans l'une des catégories suivantes :

- **Basé sur le temps (Time-Driven)** : les nœuds envoient les données périodiquement suivant un taux de transmission prédéterminé.
- **Basé sur les évènements (Event-Driven)** : les nœuds capteurs envoient les paquets de données lors de la détection d'un événement.
- **Basé sur les requêtes (Query-Driven)** : les capteurs ne livrent les données que lorsqu'ils reçoivent une requête émise par le nœud puits.
- **Hybride** : combinaison des trois modèles précédents.

2.3 Mécanismes de minimisation de la consommation de d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, la durée de vie d'un nœud capteur dépend de la durée de vie de sa batterie qui est généralement réduite et irremplaçable, c'est pour ces raisons que l'énergie représente un facteur très décisif dans les RCSFs et que tous les travaux de recherche se sont consacré afin d'élaborer des protocoles de routage efficaces en énergie [1]. Dans ce qui suit, nous allons citer quelques mécanismes visant à minimiser l'énergie de capture, de traitement et de communication dans les réseaux de capteurs sans fil. L'énergie d'un capteur peut être économisée soit au niveau de la capture, ou bien du traitement ou de la communication.

- ◇ **Energie de capture** : Pour réduire l'énergie au niveau de la capture. Consiste à réduire les fréquences et la durée de capture.

- ◇ **Energie de traitement** : La conservation d'énergie pendant le traitement peut être réalisée soit par l'approche DVS ou bien par celle de partitionnement du système [42].
Approche DVS (Dynamique Voltage Scaling), Qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances [43]
Approche de partitionnement du système, Qui consiste à transférer un calcul prohibitif (exagérer) en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul.

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

2.4 Classification des protocoles de routages

Les protocoles de routage ont été classés dans [55],[56] selon plusieurs critères (Figure 2.1)

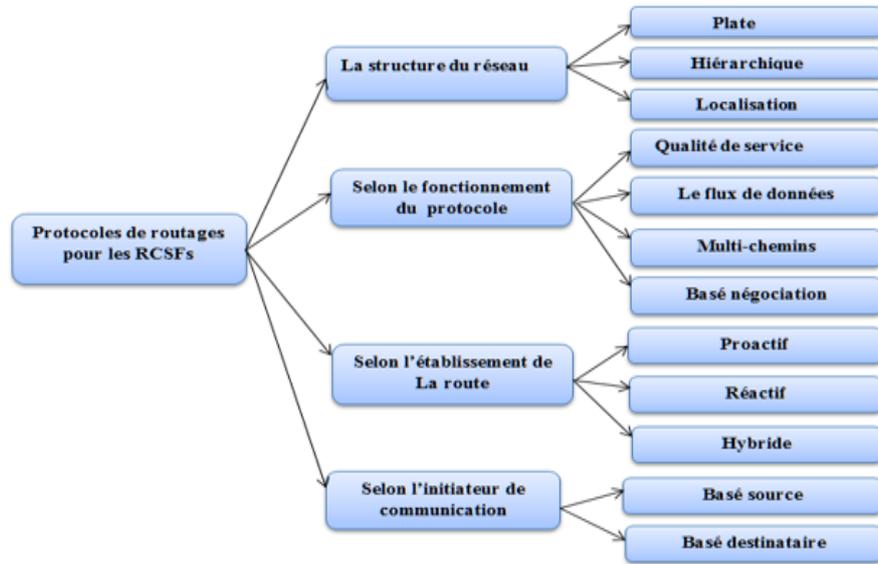


FIGURE 2.1 – Diagramme de classification des protocoles de routages.

2.4.1 Selon la structure du réseau

Elle détermine l'organisation des capteurs dans le réseau, et il existe deux catégories de topologies :

1. Topologie plate

Un réseau de capteurs sans fil plat est un réseau homogène où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de complexité du matériel et ont le même rôle, excepté la station de base qui joue le rôle d'une passerelle et qui est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final. Selon le service et le type de capteur, une densité de capteurs élevée (plusieurs nœuds capteurs/m²) ainsi qu'une communication multi-sauts peuvent être nécessaire pour une architecture plate.

Ce type de solution permet une grande tolérance aux pannes, cependant, elle souffre d'une faible scalabilité [19]. En effet, si tous les nœuds opèrent de la même façon et d'une manière distribuée, on aura un grand nombre de messages de contrôle nécessaires pour le bon fonctionnement du réseau.

• Flooding et Gossiping

La technique d'inondation (flooding) est une technique classique [14] qui peut être utilisée pour le routage dans les réseaux de capteurs. Dans cette approche, chaque nœud recevant une donnée ou un paquet de contrôle le diffuse à tous les nœuds voisins jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint ou le paquet arrive à sa destination qui est la station de base il y aura par conséquent une inondation totale du réseau .

Discussion

Flooding est un protocole réactif qui n'exige pas une maintenance onéreuse pour la topologie du réseau ni des algorithmes complexes pour la découverte des routes, mais il présente aussi des inconvénients :

L'implosion : qui s'explique par la provenance de messages dupliqués vers un même nœud.

Le chevauchement : si deux nœuds observent le phénomène dans la même région, la même information sera envoyée deux fois (redondance de données).

Ignorance de ressources : utilise aveuglement les ressources disponibles sans tenir compte de leurs quantités.

Afin d'y remédier au problème de l'implosion, le protocole Gossiping [30] est apparu qui est une légère amélioration de Flooding où un nœud recevant un message ne le diffuse pas à tous ses voisins, mais il le transmet à un seul sélectionné aléatoirement, jusqu'à ce que les données atteignent la station de base. Le problème avec cette approche est qu'elle prend beaucoup de temps à propager le message dans tout le réseau.

2. Topologie hiérarchique

Afin d'augmenter la scalabilité du système, les topologies hiérarchiques ont été introduites en divisant les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité. L'une des méthodes les plus employées est le Clustering, avec laquelle le réseau est partitionné en groupes appelés clusters. Un cluster est constitué d'un chef (cluster head) et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs ou indirects du cluster head. Avec une approche hiérarchique, il est plus facile d'intégrer un mécanisme d'agrégation au système, les nœuds membres transmettent leurs données vers le cluster head, qui va par la suite agréger ces lectures afin de transmettre le résumé à la station de base [19], l'inconvénient de la hiérarchisation est la surcharge des clusters head, induisant à un déséquilibre de la consommation d'énergie sur le réseau, pour y remédier il faut considérer les clusters head comme des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacité de traitement, ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de consommation d'énergie.

Un tas de protocoles a été présenté pour la topologie hiérarchique, nous trouvons par exemple LEACH [18] qui est le premier protocole proposé dans la littérature, nous avons aussi plusieurs améliorations de LEACH , tel que LEACH-C [], PEGASIS [45] et plein d'autres que nous développerons dans le chapitre suivant.

- **LEACH (low-energy Adaptive Clustering Hierarchy)**

LEACH est le premier protocole de routage hiérarchique avec une solution énergétique proposé par Heinzelman et al. (2000), cet algorithme emploie la technique de clustering qui divise le réseau en deux niveaux [20] :

Les Cluster Heads et les nœuds membres, le protocole se déroule en rounds, chaque round est composé de deux phases :

La phase du set-up

Durant cette phase les clusters vont se former et des ClusterHeads seront élus, en premier lieu, chaque nœud doit choisir un nombre aléatoire entre 0 et 1 c'est-à-dire $0 < Nb < 1$ et le comparer à une probabilité $T(n)$ sachant que,

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod \frac{1}{p})} & \text{si } (n \in G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec p : le pourcentage des CHs sur le réseau (généralement 5%), r : numéro du round en cours, et G : l'ensemble des nœuds qui n'était pas CH dans les $(1/p)$ rounds précédentes.

Si $Nb < T(n)$, alors le nœud sera élu comme ClusterHead, sinon il va rejoindre le ClusterHead le plus proche de son voisinage.

Par suite chaque nœud qui s'est élu CH envoie en broadcast un message d'annonce ADV en utilisant CSMA du protocole MAC [20]. C'est un message très petit il contient l'identité ID de tous les nœuds et une entête qui distingue ce message comme message d'annonce à tous les autres nœuds, Après que le nœud ait choisit à quel cluster il appartient, il doit informer son ClusterHead qu'il a choisi son cluster. Chaque nœud transmet un message join request (join-req) au CH choisie en utilisant CSMA ce message est aussi court, il contient l'Id du nœud et l'Id du CH et l'entête. De cette façon, tous les clusters seront formés et la phase d'installation est ainsi achevée.

La phase du steady-state

Les nœuds membres envoient leurs données captées aux clusters head durant leur slots de temps réservé, En utilisant l'ordonnanceur TDMA (Time Division Multiple Access), et les CHs transmettent ainsi les données à la station de base.

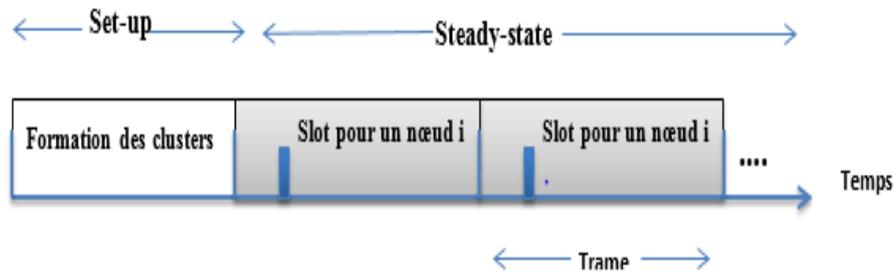


FIGURE 2.2 – description des deux phases dans LEACH.

Discussion

Leach distribue la consommation d'énergie entre les nœuds du réseau par la clustérisations dynamique, cependant, il ne prend pas en considération la contrainte d'énergie ce qui peut donner des clusters head faible en énergie en plus de la communication en un saut ce qui engendre une mort rapide des nœuds isolés.

- **LEACH-C (low-energy Adaptative Clustering Hierarchy-centralized)**

Ce protocole [54] est une version améliorée du protocole LEACH , ils adoptent presque les mêmes étapes mais avec une méthodologie de structuration totalement différente, en gardant la même phase de communication (steady-state) et une phase de groupement (set-up) plutôt différente.

- La phase du set-up

LEACH-C exige que chaque nœud transmette une annonce concernant sa localisation à la station de base au début de chaque round. Cette information peut être obtenue en utilisant sa position globale par récepteur GPS qui est activé au début de chaque round pour obtenir la localisation courante du nœud.

L'annonce comprend aussi le niveau énergétique de chaque nœud. La station de base doit assurer de ce fait la charge d'énergie qui est distribuée entre les nœuds, pour réaliser tous cela, elle calcule l'énergie moyenne des nœuds, et n'importe quels nœud ayant une énergie au-dessous de cette moyenne ne peut pas être un cluster head pour le round courant utilisant les nœuds restants comme possibles, Une fois que les clusters head optimales et les clusters associés sont trouvés, la station de base transmet cette information de nouveau à tous les nœuds dans le réseau.

Discussion

LEACH-C permet une diminution remarquable de la consommation énergétique, cependant il augmente considérablement le surcoût du réseau à cause des messages de contrôles. Des chercheurs ont prouvé que ce genre de protocole ne supporte pas le passage à l'échelle, il est particulièrement approprié pour les réseaux de petite taille.

3. Basé localisation (location-based)

Ce paradigme et la décision de routage se base sur la position géographique du nœud capteur, ce type de mécanisme nécessite un déploiement d'une solution de positionnement dont le degré de positionnement dépend de l'application, l'utilisation de GPS reste trop couteuse pour les RCSF néanmoins il existe d'autre méthodes de localisation [21].

- **GAF (Géographic Adaptative Fidelity)**

Le protocole [31] est basé sur la localisation, conçu au début pour les réseaux Ad Hoc, et efficace en consommation d'énergie, néanmoins il peut être appliqué aux réseaux de capteurs. Le principe de GAF est de former une grille virtuelle à travers le champ de captage, où chaque nœud est affecté à une zone selon les coordonnées géographiques par GPS dont l'objectif est la déconnection des nœuds inutiles du réseau sans affecter le niveau de fidélité de l'opération de routage, le niveau de fidélité concerne la connectivité persistante des nœuds capteur communicant entre eux. De ce fait les nœuds se trouvant dans la même zone de la grille sont considérés équivalents en termes de coût lié au routage des paquets, cette équivalence est assurée en utilisant un seul nœud à la fois et de mettre en veille les autres nœuds associés au même point de la grille afin d'optimiser la quantité d'énergie consommée. Ainsi GAF peut augmenter considérablement la durée de vie du réseau avec la croissance du nombre de nœud. La figure ci-dessous illustre l'exemple de la grille dans GAF, où le nœud 1 peut atteindre les nœuds 2,3 et 4, Ces derniers peuvent atteindre le nœud 5, donc les nœuds 2,3 et 4 sont équivalents alors deux d'entre eux peuvent être mis en veille.

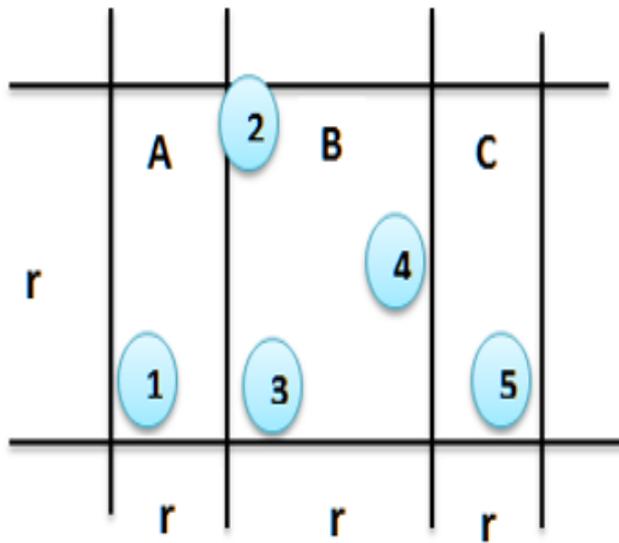


FIGURE 2.3 – illustration du protocole GAF.

Discussion

GAF utilise la position des nœuds comme moyen principal de routage et d'adressage de données. Grâce à des techniques géométriques, il achemine l'information d'une zone géographique vers une autre, ce qui permet de faciliter le contrôle de la topologie et la puissance de transmission entre nœuds, en plus l'espace de stockage en utilisant le routage avec GAF est très réduit car il ne nécessite aucune table de routage parce que le nœud achemine ses paquets seulement en se basant sur la position de la destination et sur des informations locales sur ses voisins directs cependant ce protocole ne prend pas en compte l'énergie du nœud lors du choix du représentant, ce qui peut générer des trous d'énergie dans le réseau [53]. en plus ce type de routage ne convient pas aux applications qui exigent une livraison fiable de données, car ils exigent d'équiper les capteurs par des récepteurs GPS qui sont coûteux en énergie et peu précis ce qui diminue leur degré de fiabilité.

2.4.2 Selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être initiée par les nœuds sources où bien par les nœuds destinataires.

1. Communication lancée par la source

Avec ce type de communication ce sont les nœuds capteurs qui collectent les données et les transmettent à la station de base, ces protocoles utilisent des modèles de données dirigés par les événements ou par le temps, c'est-à-dire que la donnée est envoyée à un intervalle régulier

dans le temps ou bien quand les capteurs détectent un évènement. Ainsi l'absence de requêtes générées par la station de base permet de consommer moins d'énergie et permet aussi d'éviter les problèmes des messages de contrôle.

Ceci dit, les nœuds capteurs doivent aussi avoir des informations les conduisant à la station de base, dont la préoccupation principale est d'assurer l'efficacité énergétique et la qualité de service [36],[37],[38].

2. Communication lancée par la destination (station de base)

Ce protocole utilise un modèle de données basé sur les requêtes, dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination. Autrement dit, la station de base décrit aux nœuds capteurs le type de données qu'ils doivent capter et ainsi réduire les transmissions inutiles, mais en contrepartie, les requêtes de grandes tailles affaiblissent la batterie [39].

2.4.3 Selon le mode de fonctionnement du protocole

Ce mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau, le protocole est classé en quatre catégories.

1. Routage basé sur les multi-chemins

Au lieu d'utiliser un simple chemin, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples et cela pour rendre le réseau encore plus performant, la fiabilité d'un protocole de routage peut être prouvé par sa performance à repérer des chemins alternatifs en cas de défaillance du chemin primaire, ce genre de protocole exige plus de ressources énergétiques et plus de messages de contrôle [22].

• Directed Diffusion

C'est un protocole de routage [30]de catégorie Data-Centric et appartient aussi à la famille des protocoles réactifs, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. Le protocole fonctionne comme suit :

La station de base diffuse un intérêt qui indique une liste de paires (Attribut, valeur), par exemple (température, 30), c'est-à-dire acheminer les données de tous les nœuds ayant mesuré une température supérieure à 30 [29].

Avec cette requête, la station de base aura seulement les données pertinentes dont l'utilisateur a besoin, l'intérêt est une liste qui contient la fréquence avec laquelle les nœuds vont envoyer leurs données, et il peut également avoir une estampille qui indique le moment où les nœuds vont arrêter l'envoi de ces données ainsi que l'identifient des voisins qui ont envoyé l'intérêt, et le débit vers ces voisins.

Après la réception de l'intérêt, le nœud vérifie, s'il existe dans sa mémoire il enregistre seulement l'identifiant du nœud source de telle façon à établir plusieurs gradients pour le même intérêt. Sinon, il l'enregistre et le rediffuse vers ses voisins.

Un gradient est un chemin créé dans chaque nœud qui reçoit un intérêt, Chaque nœud établit plusieurs gradients associés à chaque intérêt stocké dans sa mémoire, il est caractérisé par le débit, la durée et le temps d'expiration fournis par l'intérêt. Ces gradients sont établis afin de tracer la route pouvant être employée ultérieurement, l'une de ces routes sera ensuite renforcée pour être utilisée.

Pour réduire le coût de communication, les données sont éventuellement agrégées sur leur chemin, pour qu'à la fin il y aura un arbre d'agrégation qui permet l'acheminement des données de la source jusqu'à la station de base.

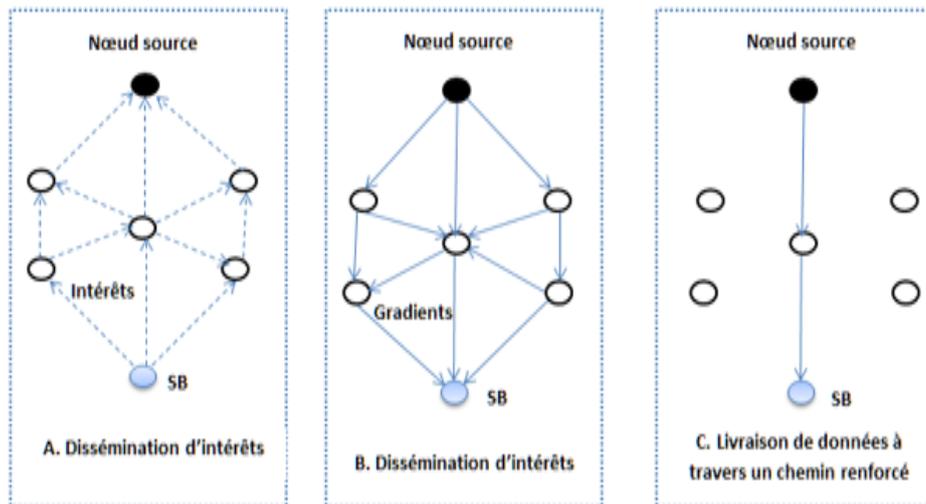


FIGURE 2.4 – Illustration du protocole de diffusion dirigée.

Discussion

Ce protocole profite de tous les avantages du routage centré-données, où toutes les communications sont voisin à voisin ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un adressage global, de plus, chaque nœud utilise des mécanismes de cache de données, et d'agrégation pour permettre une optimisation considérable en termes de consommation d'énergie et de délai.

Ceci dit, le fonctionnement de Directed Diffusion, basé principalement sur l'inondation, influence également sur les performances du protocole, notamment dans les réseaux à densité élevée. Finalement, la conception de Directed diffusion ne traite pas un réseau de capteurs avec une station de base mobile, ou au cas où toutes les composantes du réseau sont mobiles.

3. Routage basé sur le flux de données

Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente les routes que les paquets empruntent et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds [40].

4. Routage basé sur la négociation

Quand le réseau est inondé par des paquets de même données, en utilise le protocole de négociation qui met fin à la redondance de donnés, en effet avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux les données en échangeant les paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées, ces paquets permettent de vérifier si le paquet est déjà transmis ou pas, et ainsi garantir que seul les informations utiles seront transmises [22].

- **SPIN (Sensors Protocols for Information via Negotiation)**

Ce protocole de négociation [27], est conçu pour éliminer la redondance de données. Celui-ci, emploie des méta-données (Descripteurs de données) ce qui assure l'utilité des informations transmises. En effet, chaque nœud capteur possède un gestionnaire de ressources qui mesure la consommation d'énergie. Les applications interrogent ce gestionnaire pour connaître le niveau d'énergie avant une transmission ou un traitement des données. Cette technique permet de diminuer le nombre d'activation du nœud capteur quand le niveau d'énergie est bas.

Le protocole SPIN utilise trois types de messages ADV(ADVertise), REQ(REQuest), DATA. Avant d'envoyer une donnée entière (DATA), le nœud diffuse un ADV, autrement dit, une méta-données, le nœud recevant un ADV si il est intéressé par l'information, il répond par une REQ, à la réception de REQ, l'émetteur transmet au nœud intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.

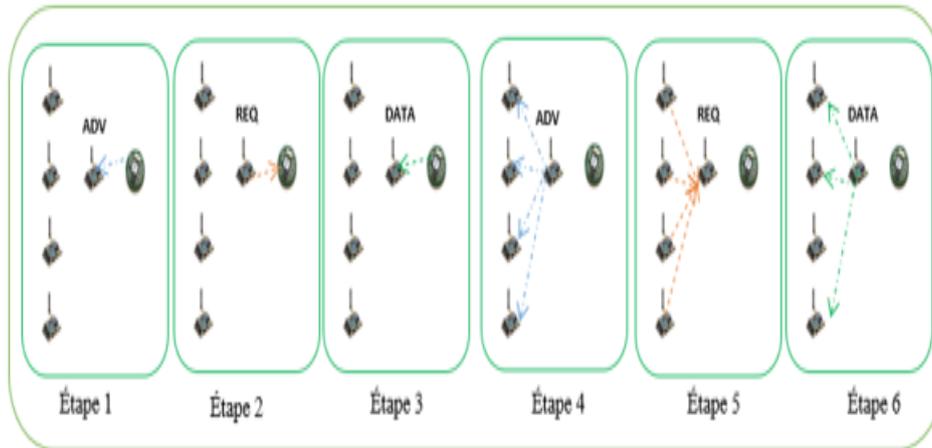


FIGURE 2.5 – illustration du protocole SPIN.

Discussion

SPIN est connu pour son traitement localisé de l'information où chaque nœud n'a besoin de connaître que son voisinage immédiat ce qui permet de préserver les mêmes performances lors d'un changement fréquent de la topologie du réseau. De plus le mécanisme de négociation permet à SPIN de réduire le taux de données redondantes.

Cependant le mécanisme d'annonce (via les messages ADV) ne garantit pas un acheminement fiable de données vers la destination. Ce qui peut se produire quand les nœuds intéressés par les données se trouvent relativement loin du capteur source, et les nœuds entre la source et la destination ne sont pas intéressés par la donnée.

5. Routage basé sur la qualité de service (QOS)

Ce protocole de routage doit équilibrer le réseau entre la consommation d'énergie et la qualité de données, en particulier satisfaire le retard, l'énergie, la largeur de la bande passante, ce genre de protocole est recommandé pour les applications de surveillance [22].

- **SAR (Sequential Assignment Routing)**

Le protocole SAR [32] est considéré comme le premier protocole qui a introduit la notion de qualité de service durant la décision de routage. Au cours de l'opération de sélection d'un itinéraire, SAR prend en considération trois facteurs importants :

La qualité de service et la consommation d'énergie pour chaque route candidate ainsi que le niveau de priorité pour chaque paquet transmis (la priorité peut être établie selon la fraîcheur

des données et leur importance). En créant des arbres, des routes multiples sont formées entre les capteurs et la station de base pilotée par une table de routage. Une de ces routes est choisie selon les critères ressources énergétiques et la QoS, en cas de rupture de route, le rétablissement est possible en proposant automatiquement une restauration à partir de la table de routage entre les nœuds ascendants et descendants.

Discussion

Bien que ce protocole assure une tolérance aux fautes et un rétablissement facile de route, il souffre d'une surcharge pour la mise à jour des tables de routage et des états de chaque nœud capteur, particulièrement quand le nombre de nœuds est élevé.

2.4.4 Selon le mode d'établissement des chemins

1. Les protocoles proactifs

Utilise l'échange de messages de contrôle pour assurer au niveau de chaque nœud une table de routage qui associe à chaque destination un voisin directe par lequel les paquets doivent être directement reliés, ce protocole permet de disposer d'une route immédiatement vers chaque destination au moment ou un paquet doit être envoyé. Ce genre de protocole est généralement utilisé pour les prélèvements périodiques des données par conséquent le protocole peut se mettre en veille durant la période d'inactivité [25] parmi les protocoles appartenant à cette catégorie nous trouvons LEACH [18], LEACH-C [54], PEGASIS [45].

2. Les protocoles réactifs

Intitulé aussi protocole de routage à la demande, ce dernier est créé et maintient les routes lorsqu'un nœud en a besoin, alors une procédure de découverte globale est lancée et elle s'achève lorsque une route est découverte ou lorsque les permutations de routes ont toutes été examinés, la route trouvée est géré par une procédure de maintenance de routes jusqu'à ce que le nœud source n'aura plus besoin de cette route [23].

- **AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector)**

Le protocole AODV [35] est spécialement conçu pour les réseaux mobiles pour créer et découvrir les liaisons entre la source et la destination.

Ce protocole permet à chaque nœud d'avoir une table de routage qui donne des informations sur ses voisins, la table joue un rôle dans le choix d'un voisin qui va transmettre les paquets de la source vers la destination. En effet, la source diffuse vers ses voisins un paquet RREQ qui contient l'adresse de la source et de la destination, un ID de diffusion, un compteur de sauts,

et deux nombres de séquence.

A la réception de RREQ un nœud qui possède une route vers la destination spécifiée répond par l'envoi d'un paquet RREP vers le voisin d'où le paquet a été reçu. Autrement, le paquet RREQ est rediffusé vers les nœuds voisins intermédiaires. Le paquet RREP contient l'adresse de la source et de la destination, un nombre de séquence de la destination, et le compteur de sauts. Un nœud intermédiaire qui reçoit le paquet RREP propage ce paquet si et seulement si :

- Il s'agit de la première copie de RREP.
- Le RREP contient un nombre de séquences de la destination plus grand que le RREP précédant.
- Le nombre de séquences de la destination est le même que le précédant RREP, mais le nombre de sauts est plus petit.

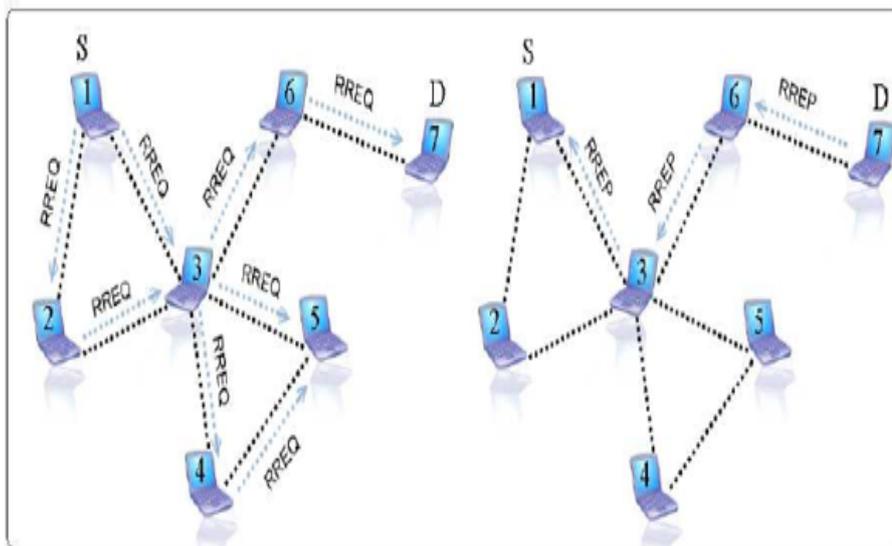


FIGURE 2.6 – illustration du protocole AODV.

Discussion

AODV offre plusieurs routes de la source vers la destination et il choisit celle qui est la plus courte, et si un tour de routage échoue, le nœud source relance la requête RREQ avec un temps T plus important, et si plusieurs séries de route Request échouent, alors aucune route ne sera trouvée.

3. Les protocoles hybrides

Ce type de protocole utilise les protocoles réactifs et proactifs à la fois, les proactifs pour apprendre quel est le voisin le plus proche, ainsi il dispose immédiatement des routes dans le voisinage, au-delà du voisinage il fait appel au protocole réactif pour chercher des routes [23].

2.5 Tableau comparatif pour les protocoles de routage à basse consommation énergétique

	Référence	Etablissement du chemin	Structure du réseau	Initiateur	Basé QoS	Basé requête	Multi-chemins	Basé négociation
F et G	[14]	Réactif	Plate	Source	Non	Non	Non	Non
LEACH	[18]	Proactif	Hiérarchique	source	Non	Non	Non	Non
LEACH-C	[54]	Proactif	Hiérarchique	Source	Non	Non	Non	Non
GAF	[31]	proactif	Localisation	source	Non	Non	Non	Non
DD	[28]	Hybride	Plate	Destination	Non	Oui	Oui	Oui
SPIN	[27]	Réactif	Plate	Source	Non	Oui	Oui	Oui
SAR	[32]	Proactif	Plate	Source	Oui	Non	Oui	Oui
AODV	[35]	Réactif	Plate	Source	Non	Oui	Non	Oui

TABLE 2.1 – Synthèse des protocoles de routage efficace en énergie.

2.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir les différentes familles de protocoles de routage assurant l'efficacité énergétique dans les réseaux de capteurs, leur étude nous a suscités à les comparer, et a mettre en relief les avantages et les inconvénients des stratégies de routages adoptées par chacun d'eux, dans le chapitre suivant nous allons nous consacrer au routage hiérarchique visant à minimiser la consommation énergétique.

CHAPITRE 3

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

3.1 Introduction

Pour assurer le passage à l'échelle des protocoles de routage hiérarchique et garantir plus d'économie en énergie pour augmenter la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil, la hiérarchisation virtuelle des réseaux peut être adoptée. Cela consiste à regrouper les nœuds en groupes dits clusters où chaque cluster est représenté par un nœud appelé Cluster Head, dont le choix se base sur plusieurs critères à savoir l'identifiant, la distance vers la station de base, l'énergie résiduelle, etc. Cette technique est appelée Clusterisation.

Une autre structure utilisée est la chaîne. Le principe d'une chaîne est qu'un nœuds ne peut communiquer qu'avec deux voisins. Nous trouvons aussi des structures qui combinent les groupes et les chaînes. En se basant sur une architecture hiérarchique, plusieurs protocoles de routage pour les réseaux de capteurs ont été proposés. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux différentes approches proposées pour le routage hiérarchique de données sur les réseaux de capteurs sans fil.

3.2 Définitions

- **Le clustering** : Le clustering est une technique pour partitionner le réseau en groupes (clusters), sachant que pour chaque groupe est désigné un leader (Cluster Head), ce dernier

communiquent avec les membres de son groupe et les Cluster Heads des autres groupes de cette manière l'opération de clustering contribue considérablement à l'économie de l'énergie, à la réduction de la complexité des protocoles de routage, et à la résistance au facteur d'échelle, en plus de l'agrégation de données qui permet d'éliminer la redondance de données et d'envoyer que les informations utiles [47].

- **Un nœud capteur** : Le nœud capteur est le composant clé du réseau c'est lui qui s'occupe du captage, du stockage, de la conduite des données et de leur traitement, cela dépend de sa capacité en terme de calcul et de puissance énergétique, et aussi le mécanisme d'affectation des rôles selon le protocole de clustering adopté [48].
- **Un cluster** : Le cluster est un ensemble de nœuds qui forme l'unité d'organisation d'un réseau de capteurs, la nature dense de ces réseaux exige la décomposition en cellules afin de simplifier les tâches de communication et répondre aux différentes contraintes [48].
- **Un Cluster Head** : Nécessaire pour organiser l'activité des clusters, il représente le chef du groupe surnommé aussi le leader, ses tâches sont diversifiées tel que l'organisation de la communication inter-clusters et intra-clusters, l'agrégation de données, il est élu par les autres nœuds ou bien pré-assignés par le concepteur du réseau, il peut être ordinaire comme les autres nœuds ou bien doté de plus d'énergie [48].
- **Une station de base** : elle se situe au niveau supérieur de la hiérarchisation d'un réseau de capteur, elle fournit une connexion entre le réseau et l'utilisateur finale [48].

3.3 Caractéristiques d'un protocole de routage hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches que nous pouvons classer dans [34] selon :

1. L'algorithme de Clustering utilisé

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature [12], il existe trois types :

- **Centralisé**

L'algorithme est exécuté sur le nœud qui a une vue globale du réseau, généralement, au niveau de la station de base, Ce type d'algorithme est peu utilisé à cause de l'overhead généré suite aux transmissions exécutées pour pouvoir garder la vue globale du réseau et la dynamique de la topologie qui fait que cette vue soit très variable.

• **Distribué**

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

2. L' élection des Cluster Heads

Le nœud Cluster Head consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le Cluster Head coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour pallier à ce problème, une rotation de ce rôle de Cluster Head est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement ou bien en fonction de la consommation de l'énergie du nœud Cluster Head [12].

3. La communication intra-cluster

La communication entre le nœud Cluster Head et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts. Dans le cas d'une communication direct (en un saut), les paquets de données sont envoyés directement au Cluster Head. Cela suppose que les nœuds membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données. Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance, entre le CH et les nœuds, est grande. Pour réduire la consommation de l'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée, dans ce cas chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH. Ce type de communications est souvent utilisé pour réduire le nombre de collisions. On trouve aussi des techniques employées au niveau MAC pour garantir un accès équitable et sans erreurs, à savoir, CDMA (Code Division Multiple Access) en utilisant un code pour chaque cluster, TDMA (Time Division Multiple Access) en allouant pour chaque nœud du cluster un temps spécifique (dit Frame) pour envoyer ses données, ou bien, FDMA (Frequency Division Multiple Access) où chaque nœud utilise une fréquence spécifique pour l'envoi de données [33].

4. La communication inter-cluster

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

5. Le niveau d'agrégation de données

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

3.4 Les protocoles de routage hiérarchique

3.4.1 LEACH-R (low-energy Adaptive Clustering Hierarchy with relai)

Ce protocole [49] est une amélioration de LEACH, il est composé aussi de deux phases cependant la probabilité de sélection de clusters head a été amélioré en lui rajoutant un seuil pour l'énergie résiduelle, ce dernier calcule aussi un nœud R pour chaque CH, ainsi le nœud relaie qui a la plus grande valeur sera responsable de communiquer les données à la station de base.

Discussion

L'ajout d'un seuil pour la probabilité de sélection de CH assure que seuls les nœuds avec une grande énergie résiduelle ont la chance d'être élu comme CH, ce qui assure l'équilibrage énergétique du réseau, aussi l'ajout du nœud R résout le problème des nœuds éloignés de la station de base cependant LEACH-R souffre du problème du point chaud à cause de la surcharge du nœud R parce que tout le trafic du réseau destiné à la station de base passe par ce dernier .

3.4.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering Sensor Information System)

Les auteurs ont proposé une version améliorée de LEACH appelée PEGASIS [45], dont l'idée principale est de former une chaîne entre les nœuds de sorte que chaque nœud reçoit et communique à 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 une politique Round-Robin, dont le but est de réduire l'énergie moyenne dépensée par un nœud

durant un 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.

Discussion

Les résultats de la simulation ont montré que PEGASIS prolonge la durée de vie du réseau et ceux en diminuant le surcout causé par le processus de formation de clusters dans LEACH, et en diminuant le nombre de transmissions et de réceptions en employant l'agrégation de données. Cependant, ce protocole est adapté seulement aux capteurs sans fil dont les nœuds sont immobiles ; et il ne gère pas la scalabilité en plus du problème du point chaud.

3.4.3 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network)

Ce protocole [50] a été proposé par Manjeshwar et Agarwal pour les applications critiques où le changement de certains paramètres peut être brusque.

TEEN utilise la même stratégie que LEACH pour l'étape de formation de clusters en plus des niveaux, mais adopte une approche différente pour la phase de transmission des données où chaque CH envoie à ses membres deux seuils : un seuil Hard HT (hard threshold), qui est la valeur seuil du paramètre contrôlé (surveillé) et un seuil Soft ST (soft threshold) représentant une petite variation ou changement de la valeur du paramètre contrôlé.

Si la valeur captée dépasse le seuil HT pour la première fois elle est stockée dans une variable SV et elle est transmise par le CH au nœud concerné, par la suite si la valeur captée dépasse la valeur stockée par une magnitude ST le nœud décide de la transmettre et stocke cette nouvelle valeur dans son cache pour les comparaisons ultérieures.

Discussion

TEEN est un protocole adéquat aux applications critiques en termes de temps, il consomme moins d'énergie puisque le nombre de messages transmis est réduit et le seuil soft peut être changé selon les besoins.

Cependant l'inconvénient principal de ce protocole est que, si les seuils HT et ST ne sont pas atteints, les nœuds ne communiqueront jamais, et aucune donnée ne sera transmise à l'utilisateur, ainsi la station de base ne connaît pas les nœuds qui ont épuisés leur énergie.

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

Pour y remédier aux limitations de TEEN, les auteurs ont proposé une amélioration Appelée APTEEN [46] qui est un protocole hybride et qui change la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans APTEEN, les CHs transmettent à leurs membres les paramètres suivants :

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

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

Discussion

En permettant à l'utilisateur de choisir l'intervalle CT, APTEEN offre une grande flexibilité .En plus des seuils HT et ST qui offre un contrôle de consommation d'énergie par la variation de ces paramètres, cependant pour implémenter les fonctions de seuils et de périodes de temps CT, APTEEN exige une plus grande complexité Ainsi, l'overhead et la complexité associée à la formation des clusters à plusieurs niveaux par TEEN et APTEEN sont assez élevés.

3.4.5 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)

Les auteurs de [51] ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé HEED pour les réseaux de capteurs. Contrairement aux techniques précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité de modifier leur puissance de transmission. HEED sélectionne les cluster heads selon un critère hybride regroupant l'énergie restante des nœuds et un second paramètre tel que le degré des nœuds. Il vise à réaliser une distribution uniforme des clusters heads dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Un nœud u est élu comme cluster head avec une probabilité P_{ch} égale à

$$P_{ch} = \frac{C_{Prob} \cdot E_n}{E_{Total}} \quad (3.1)$$

Où :

E_n est l'énergie restante du nœud n .

E_{Total} est l'énergie globale dans le réseau

C_{prob} est le nombre optimal de clusters.

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

Discussion

HEED distribue l'énergie de communication d'une manière uniforme Les CHs aussi sont distribués d'une façon meilleure à la différence de LEACH ce qui prolonge la connectivité du réseau. Ceci dit HEED souffre des messages d'overhead puisque il a besoin de plusieurs itérations pour la construction des clusters pour chaque itération plusieurs paquets sont émis sans oublier que la transmission de données qui s'effectue en un saut ce qui engendre l'épuisement rapide des nœuds lointains de la station de base.

3.4.6 TLCP (Two-Level Cluster based Routing Protocol)

TLCP [52] est un protocole de routage hiérarchique à deux niveaux, il améliore le protocole LEACH en améliorant le mécanisme de transmission de données en sélectionnant des CHs parmi les CHs des clusters, Ce protocole est exécuté en tour et chaque tour est divisé en deux phases :

- **Phase d'installation :** qui se compose aussi de deux phases

1. La formation de clusters entre les nœuds capteur

Dans cette étape, chaque nœud décide de devenir un chef de cluster, en se basant sur le seuil T (si) calculé par la formule :

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(\bmod \frac{1}{P})} * \frac{E_{res}(i)}{E_{init}} & \text{si } i \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

Où P est le pourcentage désiré des CHs, $E_{res}(i)$ est l'énergie résiduelle du nœud i , E_{ave} est l'énergie moyenne du réseau est le cycle actuel, et G est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été chefs de cluster dans les $1/P$ derniers cycles.

Cette décision est prise par les nœuds en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1, Si le nombre est inférieur au seuil T (si), Le nœud devient une tête de cluster pour le cycle actuel.

2. Formation de clusters entre les CHs

Dans cette étape, les chefs de cluster envoient leurs informations d'emplacement et de l'énergie résiduelle à la station de base, Sur la base des informations reçues, cette dernière calcule le poids de chaque CH à l'aide de l'équation suivante :

$$Weight_{(CH_I)} = E_{res(i)} * \frac{1}{dis^2toBS} \quad (3.3)$$

Puis elle sélectionne le nœud avec le poids le plus élevé parmi les CHs comme CH de second niveau.

3. Phase de Steady-state

Une fois que les clusters sont établis, les nœuds transmettent leurs messages de données vers leurs CHs au cours de leur intervalle de transmission TDMA allouée, chaque CH effectue l'agrégation des données collectées afin de réduire la quantité de données qui doit être envoyé au nœud chef. Une fois la collecte des données et l'agrégation des données dans le dernier cycle sont terminées, la transmission des données dans le cluster de second niveau commence. Dans cette étape, le CH de second niveau crée l'intervalle TDMA et l'envoie aux CHs du cluster, ces derniers

envoient leurs données agrégées au CH de cluster de second niveau au cours de leurs intervalle Alloué, le CH de second niveau effectue l'agrégation des données, et enfin les sont dirigé vers la station de base par le CH qui à l'énergie résiduelle la plus élevée de et distance la plus courte de la station de base.

Discussion

Les résultats de simulation montrent que le protocole TLCP à une meilleure performance que le protocole LEACH. Le processus de sélection de CH à deux niveaux permet de minimiser la consommation énergétique et de prolonger la durée de vie du réseau, cependant Le déploiement aléatoire des nœuds par une probabilité peut mener au problème des points isolés.

3.5 Tableau comparatif pour les protocoles de routage hiérarchiques étudiés

	Référence	Mobilité	Localisation	Agrégation de données	QOS	Scalabilité
PEGASIS	[45]	nœuds fixes	Non	Distribué	Non	Limitée
LEACH-R	[49]	nœuds fixes	Non	Distribué	Non	Limitée
TEEN	[50]	nœuds fixes	Non	Centralisé	Non	Limitée
APTEEN	[46]	nœuds fixes	Non	Centralisé	Non	limitée
HEED	[51]	nœuds fixes	Non	Centralisé	Non	Bonne
TLCP	[52]	nœuds fixes	Oui	Centralisé	Non	Bonne

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

3.6 Conclusion

L'étude des différentes approches de routage hiérarchique nous a permis de bien comprendre les techniques de clustering ainsi que de mettre en relief les avantages et les inconvénients des approches adoptées pour cette techniques de routage, ce qui nous a inspirés pour mettre en œuvre une proposition pour le routage hiérarchique à basse consommation énergétique que nous allons présenter dans le chapitre suivant

CHAPITRE 4

CONTRIBUTION : LOW ENERGY ADAPTIVE CLUSTERING HIERARCHY WITH LEVELS RELAY (LEACH-LR)

4.1 Introduction

Le plus grand défi des chercheurs est de concevoir un protocole de routage efficace qui répond aux différentes exigences tel que : la scalabilité, la qualité de service la mobilité et enfin l'efficacité énergétique qui est l'impact à considérer dans notre proposition. En effet, la majorité des protocoles de routage hiérarchiques existants dans la littérature ont abordé la question d'énergie qui joue un rôle décisif durant l'opération de routage de données vers la station de base, où le risque d'épuisement d'un nœud est un évènement à prévoir pour éviter la perte de la connectivité du réseau et assurer la transmission de données vers leur destinataire final ainsi prolonger la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre nous proposons un protocole de routage hiérarchique a basse consommation énergétique pour un réseau de capteurs sans fil, notre intérêt s'est porté sur la notion du multi-saut à travers une description détaillé des différentes phases qui le constitue. L'approche baptisé LEACH-LR s'appuie sur le principe du nœud relai inspiré du protocole de LEACH-R [53], dont la formation de clusters garde le même principe que celui de LEACH[18] en lui rajoutant la contrainte d'énergie, avec un repartitionnement du réseau en des niveaux de

ClusterHeads.

4.2 Description de la contribution

Durant la conception d'un protocole de routage hiérarchique, nous devons prévoir toutes les contraintes afin d'y remédier et de rapporter des solutions. Sachant que l'obstacle le plus fréquemment rencontré est le facteur d'échelle où le protocole perd son efficacité avec la croissance du nombre de nœuds dans le réseau. Notre approche se base sur la hiérarchisation du réseau en plusieurs niveaux pour permettre une communication multi-saut, ce qui permet de réduire l'énergie de transmission avec des signaux radio à distance réduite au lieu d'une transmission à grande portée qui consomme beaucoup plus d'énergie en plus la communication multi-saut assure une meilleure qualité de réception de données en évitant les collisions grâce à la petite portée du signal qui n'affecte pas les transmissions voisines .

Pour faciliter la structuration en niveaux nous avons choisi des nœuds qui vont assurer le routage multi-saut et ceux grâce à la présence d'un nœud relai (nœud R) pour chaque niveau inspiré du protocole LEACH-R.

La présence de plusieurs nœuds relais dans le réseau au lieu d'un seul permet de préserver l'énergie de celui qui communique directement avec la station de base (premier niveau) car l'opération d'agrégation de données est effectuée par chaque nœud R dans les niveaux inférieurs ce qui réduit la quantité de données à agréger, de ce fait le nœud R de premier niveau de notre protocole perd moins d'énergie que dans le cas de LEACH-R[49].

La présence de la contrainte d'énergie dans la probabilité de LEACH donne des ClusterHeads avec une plus grande énergie résiduelle.

Notre Protocole LEACH-LR est un protocole de routage hiérarchique qui s'appuie sur le principe de clustering dynamique, il permet d'organiser le réseau en niveaux afin d'assurer un routage multi-sauts entre les nœuds et la station de base. Dans cet objectif, nous avons défini un nouveau mécanisme de routage qui permet de réduire la consommation énergétique des nœuds capteurs dans le réseau.

4.2.1 Hypothèses

Notre solution est basée sur un réseau de capteurs sans fil homogène (des capteurs semblables physiquement). Les capteurs (nœuds) sont déployés aléatoirement sur une surface carrée, et supposés être statiques, ce qui est le cas de nombreux RCSFs. Les différentes hypothèses

sur lesquelles repose notre travail sont décrites comme suit :

- Les nœuds capteurs sont tous fixes et identiques (même énergie initiale, même capacité de Stockage et de traitement de données).
- La portée maximale d'un nœud capteur est supposée pareille pour tous les nœuds du réseau.
- Les nœuds capteurs peuvent gérer leurs puissances de transmission.
- La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie.
- Tous les nœuds peuvent atteindre la station de base.
- La station de base se trouve loin de la zone de capture et elle est considéré comme une ressource non limité ni épuisable.

4.2.2 Fonctionnement de notre protocole

Notre approche s'est basée sur une amélioration de protocole LEACH-R ainsi que la répartition du réseau en 4 niveaux en employant un routage multi-saut

• LEACH-R

Ce protocole [49] proposé par Ningbo WANG et Hao ZHU tout comme LEACH utilise deux phases ; cependant la phase du Set-up a été modifiée par l'ajout de la probabilité du seuil amélioré pour la sélection du CH, le seuil est décrit comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*(r \bmod \frac{1}{P})} * (\delta P + (1 - \delta P) * \frac{E_{\text{current}}}{E_{\text{initial}}}), & \text{si } n \in G \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

Sachant que E_{residual} est l'énergie résiduelle du nœud , E_0 l'énergie initiale du nœud, et δ le nombre consécutive de rounds dans lequel le nœud n'a pas encore été élu CH. une fois que le nœud est élu CH, sa valeur sera réinitialisé à 0.

Ce seuil assure aux nœuds avec une grande énergie résiduelle et au même temps ceux qui n'ont pas été élus CHs durant un grand nombre de rounds une plus grande chance d'être élus CHs, ce qui assure l'équilibrage énergétique du réseau. Ainsi, les nœuds choisissent leurs CHs à joindre selon la force du signal reçu, ce processus est similaire à celui de LEACH.

Après la sélection des ClusterHeads, on passe à la sélection du nœud R ou Chaque CH élu diffuse aux autres nœuds CHs les informations concernant sa distance par rapport à la station de base et son énergie résiduelle, puis le nœud qui a la plus grande valeur du paramètre λ devient le nœud relai. La valeur de λ est calculée comme suit :

$$\lambda = \frac{E_{\text{residual}}}{d_{t0SB}} \quad (4.2)$$

Tel que : E_{residual} est l'énergie résiduelle du CH, et d_{t_0SB} sa distance vers la station de base.

Le CH qui a le plus grand λ sera élu comme le nœud R, c'est-à-dire, le nœud ayant la plus grande énergie résiduelle et la plus petite distance vers la station de base. Le nœud R est le seul à pouvoir envoyer directement les données à la station de base. Durant la phase de steady state tous les clusters head enverront leurs données au nœud R qui va les agréger et les transmettre à son tour vers la station de base.

- Le problème de LEACH-R est que le nœud R est responsable de l'agrégation de toutes les données du réseau, ce qui peut engendrer l'épuisement du nœud relai avant la transmission de données à la station de base.

- En plus, les nœuds qui sont proches de la station de base sont plus souvent choisis comme étant le nœud R, ce qui épuise plus rapidement leur énergie que les autres CHs, car tout le trafic du réseau destiné à la station de base passe par le nœud-R et donc ce nœud a plus de charges que les nœuds distants (problème du point chaud) ce qui peut réduire la couverture de détection et conduire à la perte du réseau.

- La présence d'un seul nœud R dans le réseau ne résout pas toujours le problème d'épuisement des ClusterHeads isolés de la station de base en deux sauts.

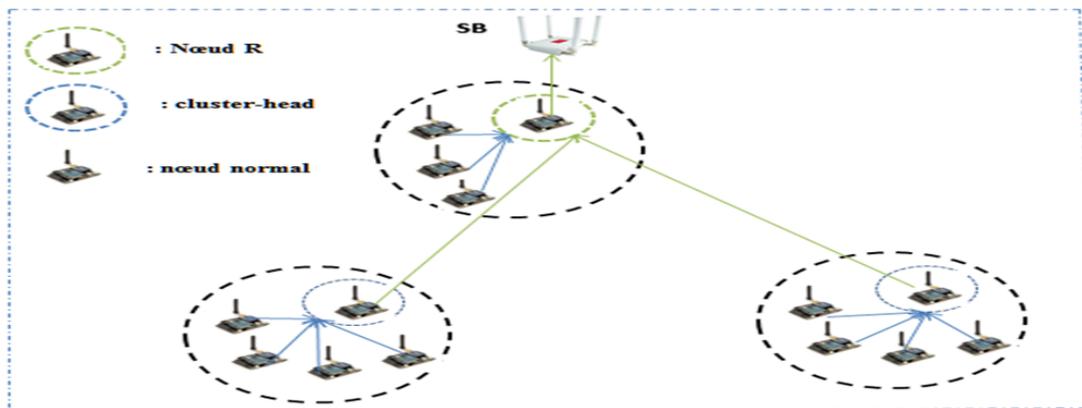


FIGURE 4.1 – Illustration du protocole LEACH-R.

Notre protocole résout toutes ces contraintes et il se déroule en deux phases et chaque phase est décrite comme suit :

Phase 1 : organisation de groupes

Cette phase garde la même probabilité que celle de LEACH-R ,sachant que la contrainte d'énergie permet d'avoir de meilleurs clusters head cela est bien défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*(r \bmod \frac{1}{P})} * (\delta P + (1 - \delta P) * \frac{E_{current}}{E_{initial}}), & \text{si } n \in G \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.3)$$

Avec $E_{current}$ l'énergie courante d'un nœud , $E_{initial}$ l'énergie initiale d'un nœud. et δ le nombre de rounds dont un nœud n'a pas été élu CH, et il sera réinitialisé à 0, dès qu'il devient CH.

On a :

$$\delta P + (1 - P) * \frac{E_{current}}{E_{initial}} < 1 \quad (4.4)$$

, alors le seuil $T(n)$ restera toujours inférieur à 1.

Après la génération d'un nombre aléatoire entre 0 et 1 par chaque nœud du réseau, si ce nombre est inférieure à $T(n)$,le nœud sera élu ClusterHead et les clusters seront formés comme dans LEACH.

Phase 2 : communication

Après la formation des clusters vient la construction des niveaux, pour maintenir une bonne communication entre les différents clusters avec l'hypothèse que le réseau doit être découpé en 4 niveaux respectifs selon la variation de λ dont le calcul est décrit comme suit :

Tout d'abord nous supposons que la station de base connaît déjà au préalable la distance qui la sépare de chaque ClusterHead en raison des traitements déjà effectués.

Durant la première étape, elle envoie un message de contrôle (MC) à ces derniers afin de recevoir des informations sur le niveau énergétique de chaque cluster head, de ce fait la station de base calcule les λ de tous les clusters head sachant que :

$$\lambda = \frac{E_{residual}}{d_{toSB}} \quad (4.5)$$

Tel que $E_{residual}$ est l'énergie courante du CH et d_{toSB} la distance par rapport à la station de base. Par suite, la station de base diffuse à tous ses ClusterHeads les résultats de calcul de λ de chaque ClusterHead accompagné de son identifiant id, ainsi nous supposons que le réseau sera découpé en quatre niveaux au maximum et seront formés selon les étapes suivantes :

- Le premier niveau est représenté par le nœud cluster head ayant la plus grande valeur de λ celui-ci est le seul pouvant envoyer directement à la station de base. Nous l'appellons le nœud

R1.

$\Omega = \text{Max}(\lambda)$ où $\Omega = \lambda_{R1}$

- Le deuxième niveau représente les nœuds ClusterHeads ayant la valeur de λ supérieure ou égale au trois quarts de Ω et inférieure à Ω autrement dit :

$$\frac{3\Omega}{4} \leq \lambda < \Omega$$

Les ClusterHeads de ce niveau transmettent les données vers le nœud R1 qui transmet à son tour à la station de base. On appelle le nœud R2, le ClusterHead ayant la valeur maximale des λ des ClusterHeads du 2ème niveau.

- Le troisième niveau regroupe les ClusterHeads dont la valeur de λ est entre la moitié et les trois quarts de Ω c'est-à-dire

$$\frac{\Omega}{2} \leq \lambda < \frac{3\Omega}{4}$$

Ces derniers envoient vers le nœud R2, qui transmet au niveau supérieur. On appelle le nœud R3, le cluster head ayant la valeur maximale des λ des CHs du 3ème niveau.

- Le quatrième niveau contient les clusters head dont la valeur de λ est inférieure à la moitié de Ω c'est-à-dire

$$\lambda < \frac{\Omega}{2}$$

Pour être plus expressif, cette phase assure la transmission de données vers la station de base sachant que durant la communication intra-clusters les nœuds membres envoient leurs données captées au ClusterHead durant leur slot de temps réservé, alloués par leurs ClusterHeads en utilisant l'ordonnanceur TDMA (Time Division Multiple Access), ainsi les nœuds éteignent leurs interfaces de communication en dehors de ce slot ce qui permet d'éviter les collisions et d'économiser de l'énergie, les paquets reçus sont ensuite agrégés par le ClusterHead afin d'éviter la redondance de données et la surconsommation d'énergie. Pour la communication inter-clusters, chaque ClusterHead envoie ses données agrégées au nœud relai du niveau supérieur, ainsi les données transitent de niveau en niveau à travers les nœuds relais jusqu'à la station de base, sachant qu'une agrégation est effectuée au niveau de chaque nœud R, ce qui allège la consommation énergétique et évite la redondance de paquets.

Dans la mesure où il existe un niveau dans le réseau qui ne comporte pas le nœud R, les données agrégées du niveau inférieure seront directement transmises au niveau qui succède le niveau qui ne comporte pas de nœuds R.

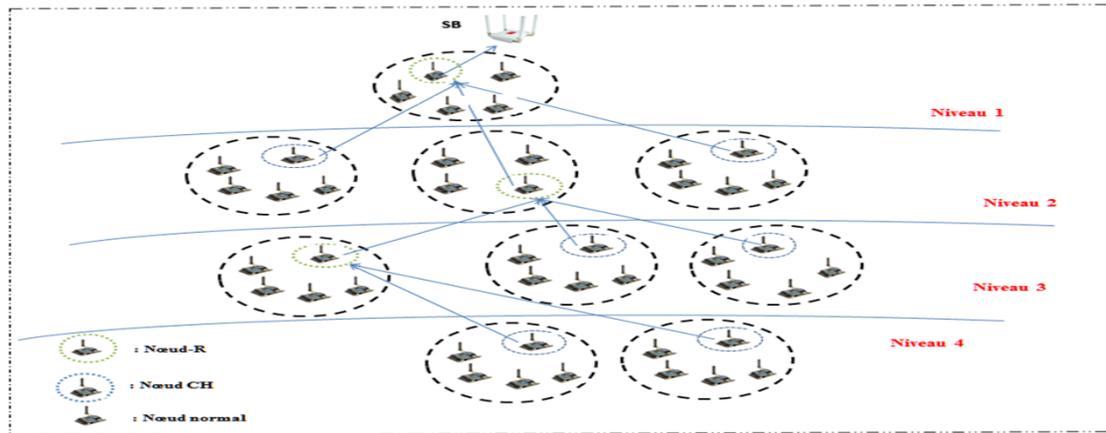


FIGURE 4.2 – Architecture du protocole.

4.3 Simulation et analyse de performances

Une simulation consiste à gérer le temps ainsi que les actions qui sont liées aux différents instants d'un système réel et à faire fonctionner abstraitement le modèle qui représente ce système. On distingue plusieurs modèles de simulation tel que : NS-2, OMNet++, Glomosim, SENSE, TOSSIM, BOIDS et Shawn [44], nous avons choisis comme environnement de simulation le MATLAB.

4.3.1 Le choix de MATLAB

Produit par MathWorks, MATLAB est un logiciel de calcul numérique disponible sur plusieurs plateformes, c'est aussi un langage simple et efficace et beaucoup plus concis. Que les autres langages de programmation, il optimise le code des programmes en utilisant des fonctions prédéfinies, il traite les matrices comme de simples variables, en plus il contient des interfaces graphiques puissantes où nous pouvons les enrichir avec des boîtes à outils qui sont attribués pour des actions particulières (traitement de signal, statistique, etc.) MATLAB est aussi un langage de programmation de haut niveau dans lequel nous trouvons les concepts de langages de programmation modernes tel que : le pascal, C++.

L'ordre d'exécution des instructions est déterminé par des structures de contrôle, tous ces avantages ont rendu MATLAB comme un langage de programmation très sollicité par les chercheurs.

4.3.2 Modèle de Propagation du signal Radio

Pour cette analyse, nous allons utiliser le modèle énergétique de LEACH[20], où la transmission ETX et la réception ERX d'un message de l bits entre deux nœuds de distance d sont

calculés comme suit :

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} l * E_{elec} + l * \epsilon_{fs} * d^2, & \text{si } d < d_0 \\ l * E_{elec} + l * \epsilon_{amp} * d^4, & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.6)$$

et

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

Tel que : E_{elec} est l'énergie dissipée par bit pour la transmission et la réception. On utilise aussi le modèle free-space ou le modèle two-ray selon la distance entre l'émetteur et le récepteur. d_0 est le seuil de distance de transmission et

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (4.8)$$

Si $d < d_0$, On utilise alors le modèle free space sinon le modèle two ray. ϵ_{fs} et ϵ_{amp} sont les paramètres d'amplificateur des deux modèles.

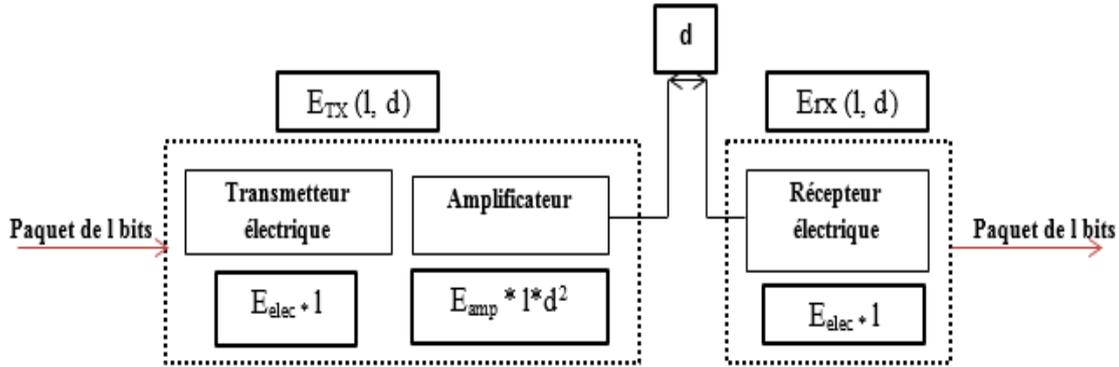


FIGURE 4.3 – Modèle d'énergie utilisé.

On peut alors connaître comment l'énergie se dissipe dans le réseau par notre protocole dans chaque round. Chaque ClusterHead, dans une communication intra-cluster, perd de l'énergie en recevant des signaux depuis les nœuds de son cluster, agrège les signaux et transfère le signal agrégé vers le ClusterHead de niveau supérieur, Alors l'énergie dissipée est :

$$E_{CH} = \begin{cases} k * l * E_{elec} + E_{DA} + k * l * \epsilon_{fs} * d^2, & \text{si } d < d_0 \\ k * l * E_{elec} + E_{DA} + k * l * \epsilon_{amp} * d^4, & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Où E_{DA} est l'énergie consommée pour un bit dans l'agrégation de données, k le nombre de nœuds dans le cluster. Puis, le ClusterHead relai de chaque niveau reçoit des données depuis les CHs du niveau inférieur, les agrège et les transfère aux nœuds du niveau supérieur. Donc on a :

$$E_{CHR} = \begin{cases} n * l * E_{elec} + E_{DA} + l * \epsilon_{fs} * d^2, & \text{si } d < d_0 \\ n * l * E_{elec} + E_{DA} + l * \epsilon_{amp} * d^4, & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Tel que n est le nombre de nœuds CHs du niveau inférieur. Un nœud normal a besoin de transmettre les données vers le ClusterHead une seule fois pendant un round. En supposant que la distance entre un nœud et son ClusterHead est petite, l'énergie utilisée par chaque nœud normal est :

$$E_{nonCH} = l * E_{elec} + E_{DA} + l * \epsilon_{fs} * d_{toCH}^2 \quad (4.11)$$

Où d_{toCH}^2 est la distance entre le nœud et son ClusterHead.

4.3.3 Paramètres de simulation

Les nœuds capteurs utilisés dans la simulation sont considérés comme homogènes possédant la même quantité d'énergie initiale, les mêmes capacités de calcul et mémoire, les mêmes portées de transmission et équipées par les mêmes interfaces de communication IEEE 802.11. De plus, l'énergie de la station de base est considérée comme illimitée. Le réseau est composé de 100 jusqu'à 500 nœuds, déployés sur une zone carrée de dimension $100 \times 100(m^2)$. Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés :

Description	Symbole	Valeur
Nombre de nœuds	N	100
Energie initiale des nœuds	E_{init}	0.5 J
Energie consommée par l'amplificateur pour une petite distance	ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
Energie consommée par l'amplificateur pour une grande distance	ϵ_{amp}	0,0013 pJ/bit/m ⁴
Energie de transmission et de réception par bit	E_{elec}	50 pJ/bit
Taille des paquets de données	l	4000 bits
Taille des paquets de contrôle	l_{ctrl}	100 bits
Energie d'agrégation	E_{DA}	5 pJ/bit/report
Probabilité de Cluster de LEACH	p	0.05

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

- **Energie résiduelle**

Elle est exprimée par la différence entre l'énergie courante et l'énergie consommée par un capteur. L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation suivante :

$$E_c = E_c - E_x \begin{cases} E_x = E_e & \text{Si le capteur envoie un message,} \\ E_x = E_r + E_t & \text{Si le capteur reçoit un message.} \end{cases} \quad (4.12)$$

- **Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D**

C'est l'affectation de deux valeurs aléatoires (x et y), comprises entre 0 et la taille du terrain, à chaque capteur sur un plan à deux dimensions.

- **Distance entre deux capteurs**

C'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées (x, y) et un autre de coordonnées (x_0, y_0) :

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (4.13)$$

La figure ci-dessous montre le déploiement aléatoire des nœuds dans un champ 100 x 100 mètres carrés.

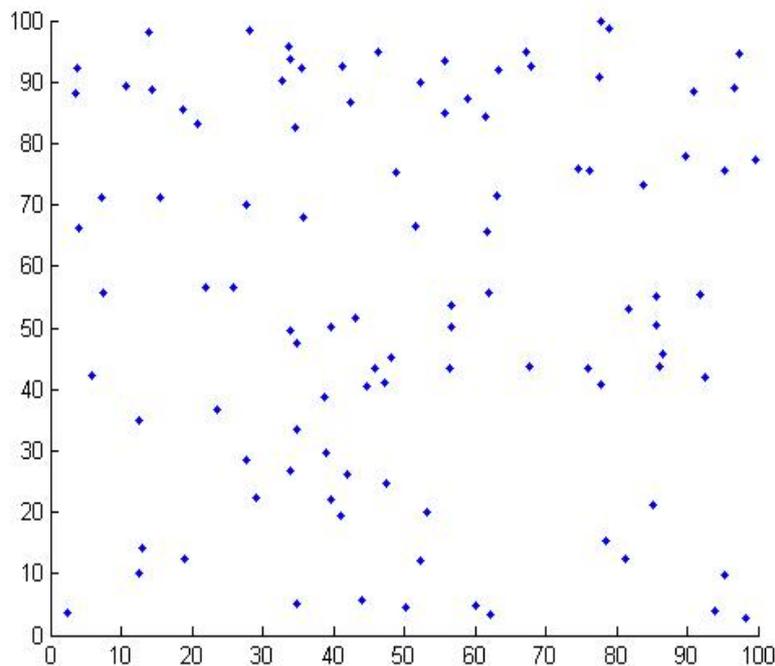


FIGURE 4.4 – Déploiement des nœuds.

4.3.4 Evaluation de performances

Dans ce qui suit, nous allons présenter, analyser, et comparer les résultats de simulations obtenus avec MATLAB des trois protocoles LEACH, LEACH-R, et LEACH-LR suivant les métriques discutées précédemment

Nous allons d'abord présenter comment l'énergie des nœuds se dissipe dans le réseau en fonction du nombre de rounds :

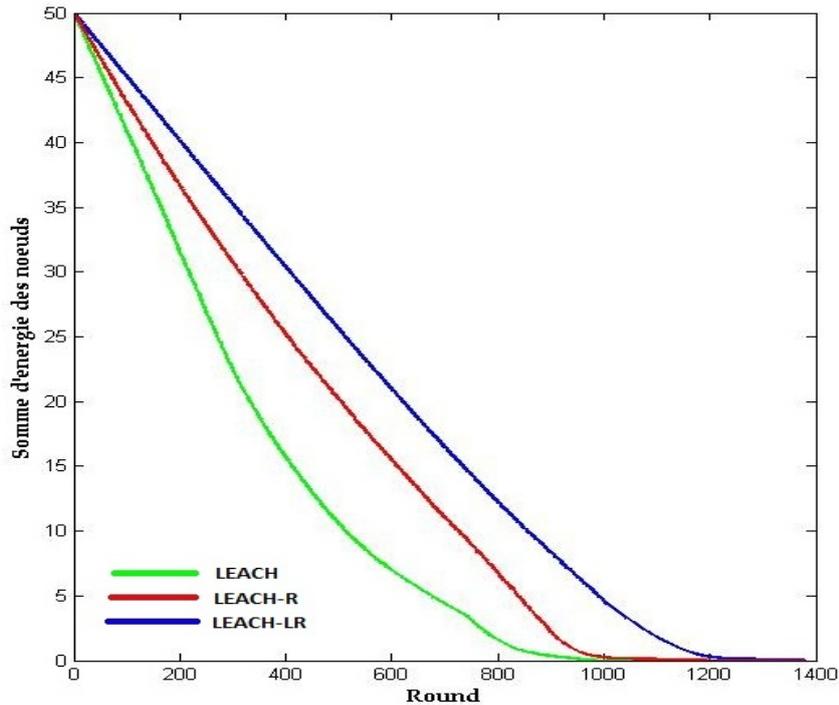


FIGURE 4.5 – Somme d'énergie des nœuds par round

Dans la figure ci-dessus, Nous pouvons remarquer que le protocole LEACH-LR surpasse le protocole LEACH-R avec un pourcentage moyen de 15 % et de 39 % par rapport à LEACH qui épuise toute son énergie vers 986 rounds, et cela est dû aux grandes distances des nœuds à la station de base. Pour LEACH-R, l'énergie est totalement épuisée vers le round 1195 alors que LEACH-LR qui utilise le multi-saut pour pouvoir envoyer des paquets à la station de base tient jusqu'à 1379 rounds.

Avec les paramètres de simulation que nous avons utilisé, Nous avons pu aussi connaître le nombre de nœuds qui meurent en fonction du nombre de rounds pour les 100 capteurs déployés :

La comparaison entre le premier capteur (FND), les 50%(HND) , et le dernier (AND) des nœuds qui meurent dans le réseau nous donne l'histogramme suivant :

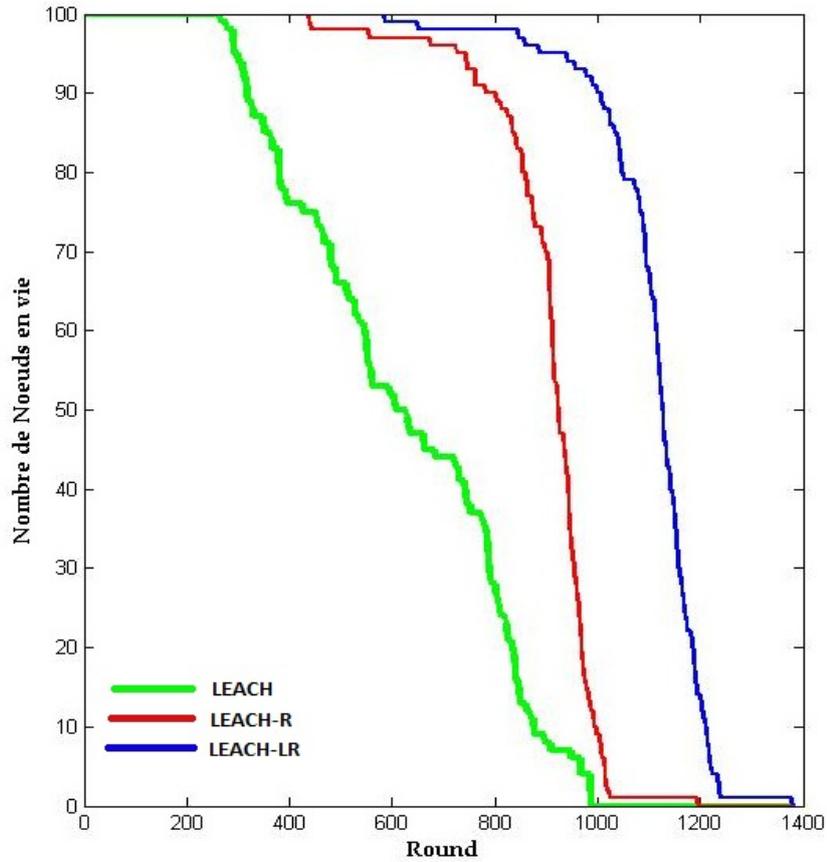


FIGURE 4.6 – Nombre de nœuds en vie par round

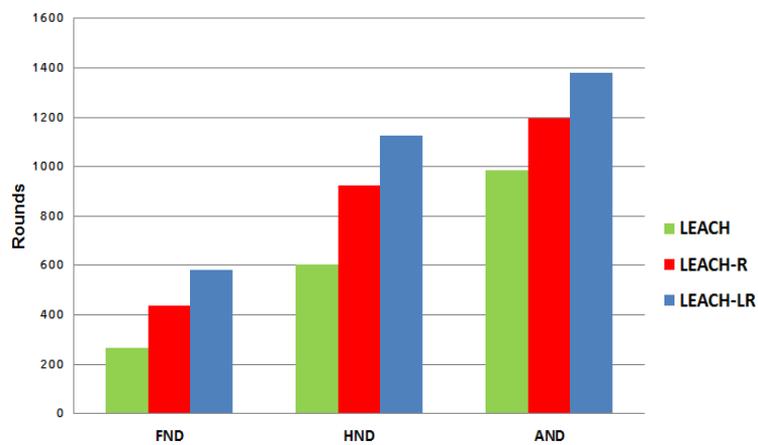


FIGURE 4.7 – Comparaison de FND, HND, et Durée de vie du réseau

Si Nous comparons les trois protocoles, Nous remarquons qu'avec LEACH le premier nœud meurt à 267 rounds et LEACH-R à 438 rounds, alors que LEACH-LR c'est jusqu'à 584 rounds. Pour que tous les nœuds du réseau soient morts il faut 986 rounds pour LEACH, 1195 rounds pour LEACH-R, et pour LEACH-LR il faut 1379 rounds, ce qui augmente la durée de vie du réseau de 15 % par rapport à LEACH-R.

Et pour étudier la durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds déployés nous avons suivi l'évolution de 1000 noeuds par rapport au temps pour les trois protocoles LEACH, LEACH-R et LEACH-LR au niveau du premier, des 50%, 75% et de 100% nœuds qui meurent dans le réseau, Nous avons obtenus les résultats suivants :

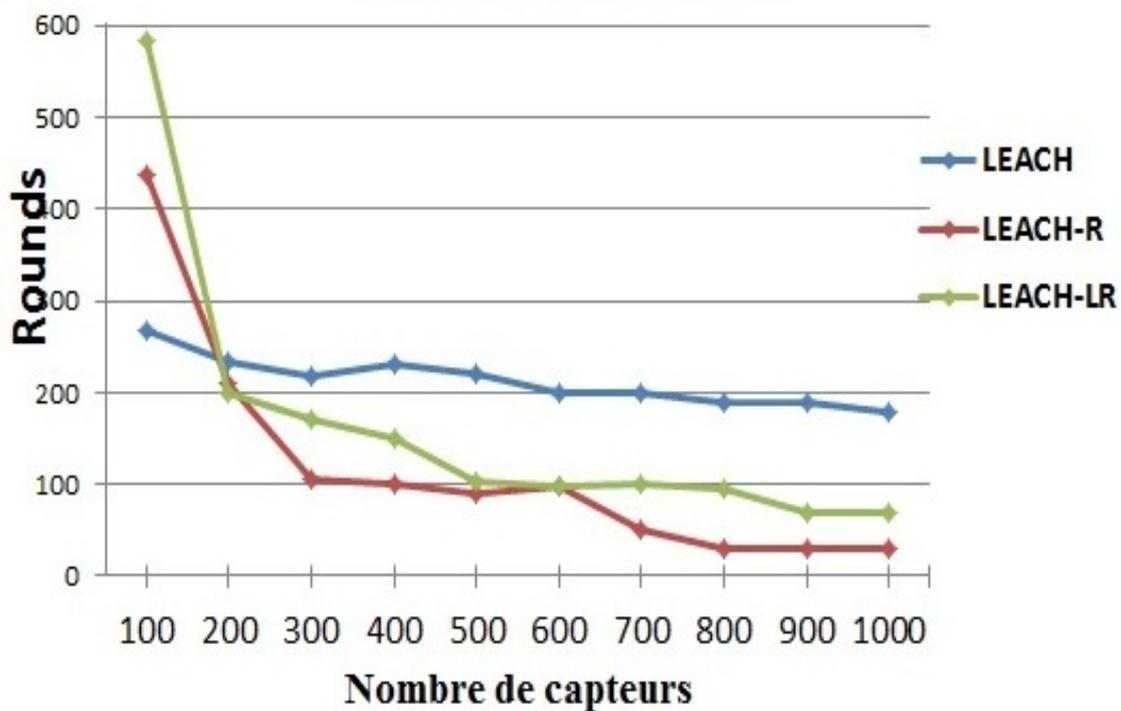


FIGURE 4.8 – La mort du premier capteur en fonction du nombre de nœuds

Pour le premier capteur qui meurt, LEACH-LR est plus performant que LEACH-R qui dépasse LEACH qui est le premier à perdre un nœud quand 100 nœuds sont déployés, mais à partir de 200 capteurs, c'est LEACH qui est le dernier à perdre le premier nœud, ceci est dû à la surcharge de messages sur le nœud relais dans LEACH-R et dans LEACH-LR.

Le graphe ci-dessus représente la mort de 50 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds qui varie entre 100 et 1000, À l'augmentation du nombre de nœuds, nous remarquons que notre protocole est plus performant par rapport à LEACH et LEACH-R.

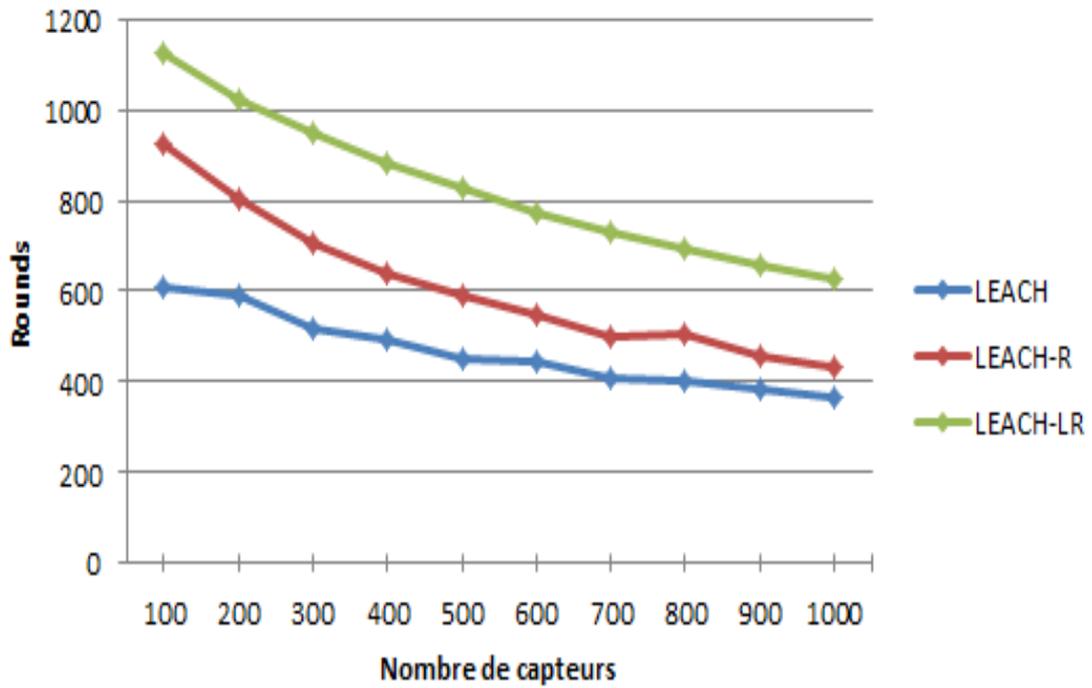


FIGURE 4.9 – La mort de 50 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds

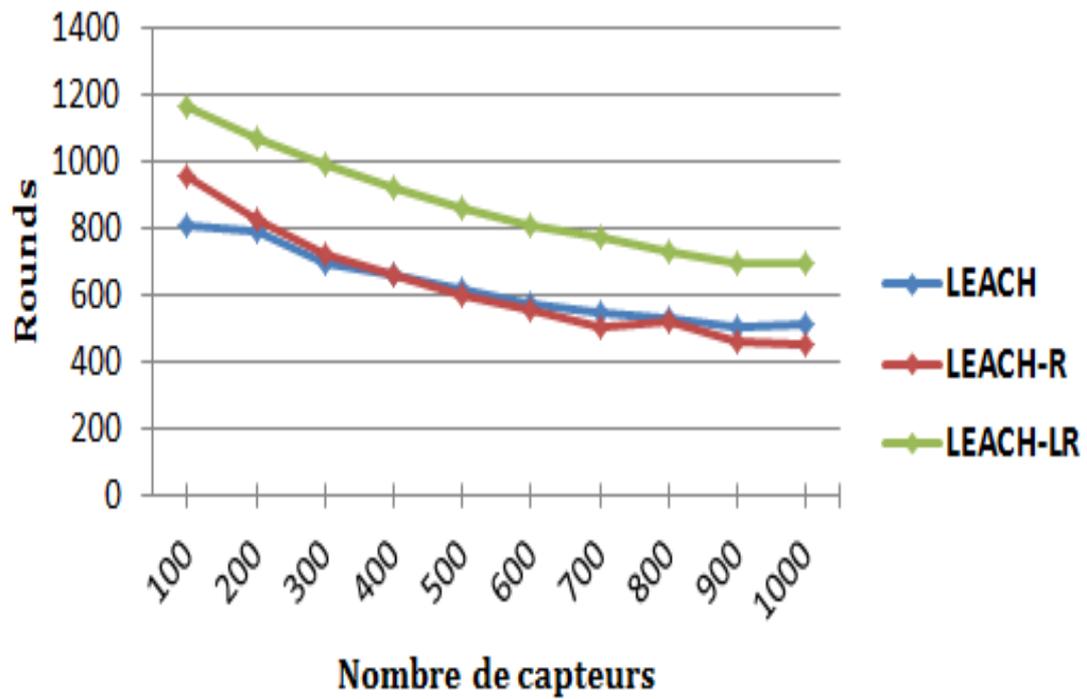


FIGURE 4.10 – La mort de 75 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds

La figure 4.10 représente la mort de 75 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds pour les 3 protocoles LEACH, LEACH-R, et LEACH-LR .

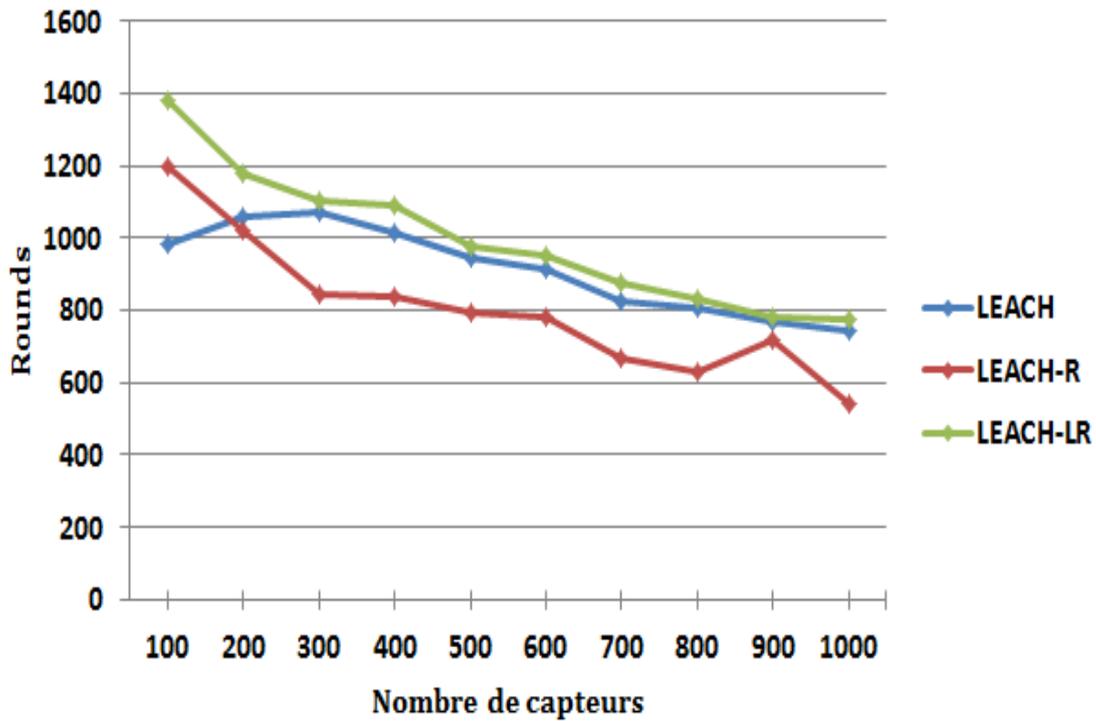


FIGURE 4.11 – La mort de 100 % des capteurs en fonction du nombre de nœuds

La figure 4. 11 représente la mort du dernier capteur en fonction du nombre de nœuds. On peut remarquer que la durée de vie de notre protocole LEACH-LR est prolongée jusqu'à 775 rounds. Donc, le protocole proposé LEACH-LR assure la scalabilité.

4.4 Conclusion

Après observation des résultats de simulation faites, Nous pouvons conclure que notre contribution LEACH-LR est plus performant que le protocole LEACH-R ce qui est dû au caractéristiques du multi-saut utilisés dans notre proposition.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les réseaux de capteurs sans fil ne cessent d'envahir les marchés, vu leur nécessités dans les différents domaines d'application, toutes fois cette technologie émergente est dépendante d'une contrainte qui influence sa durée de vie ainsi que la durée de vie du réseau en entier, c'est la contrainte d'énergie, Pour cela les concepteurs des réseaux de capteurs se sont consacré à la réalisation d'un tas de protocoles de routage hiérarchiques visant à minimiser l'énergie de consommation. Dans cette vision, ce type routage s'est avérer comme un aboutissement prometteur pour la conservation d'énergie et faciliter le routage de données des nœuds capteur vers la station de base.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la problématique d'économie d'énergies lors du routage de données ce qui est dû aux zones de déploiement qui sont parfois inaccessibles par conséquent la batterie des nœuds aussi sera difficile à recharger ,Pour se faire nous avons commencé par présenter les généralités qui entourent le domaine des RCSFs, puis nous avons réalisé un état de l'art sur les approches de routage pour bien distinguer entre les différentes techniques de routage utilisés, ensuite nous sommes passés aux routages hiérarchiques et avons discuté de l'ensemble des protocoles minimisant la consommation d'énergie afin de proposer dans un second lieu un nouveau protocole de routage hiérarchiques a basse consommation énergétique qui prend en considération les contraintes imposés par les approches déjà revisiter afin d'accomplir quelques améliorations.

Notre approche baptisé LEACH-LR permet une gestion plus efficace des ressources énergétiques lors du routage de données dans le réseau, il organise le réseau en niveaux, selon l'énergie et la distance par rapport à la station de base des nœuds relais ,sachant qu'un nœud relai est le nœud le plus puissant en terme d'énergie ce qui règle le problème de la surcharge du nœud relai le plus proche de la station de base (problème du point chaud) , le découpage en niveau permet

une communication multi-saut entre les nœuds des différentes couches ce qui consomme moins d'énergie pour atteindre de la station de base , l'évaluation de performance de notre protocole a été simulé en MATLAB dans laquelle nous avons constaté que notre approche est bien meilleure que LEACH et LEACH-R sachant que la comparaison est faite selon deux critères de performances tel que la consommation énergétiques et la durée de vie du réseau .

Comme perspective de notre travail, nous voudrions appliquer notre approche dans un environnement mobile et étudier la possibilité de la mobilité de la station de base et des nœuds capteurs, ainsi que de mettre en pratique LEACH-LR dans un environnement réel des réseaux de capteurs sans fil.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. KHELLADI N. BADACHE. *Les réseaux de capteurs : état de l'art. Rapport de recherche*,. Laboratoire des Systèmes Informatique, Université Bab Ezzouar, Alger, Février 2004.
- [2] D. DUCHAMP N. F. REYNOLDS. *Measured performance of wireless LAN. Technical Report*. Computer Science Department, Columbia University, NY, UnitedStates, September 1992.
- [3] B.S.HAGGAR. *Les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc, Rapport de stage*. Université de Reims - UFR Sciences, 2007.
- [4] L. ZIANE KHODJA M. YAZID. *Analyse des performances du standard IEEE 802.11 mode ad hoc dans un environnement radio : De la modélisation analytique à la simulation, mémoire d'ingénieur*. Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, 2008.
- [5] A.BARROS C.Bérenghier D.CHARPENTIER, F.BRISSAUD. *capteur intelligents : nouvelles technologie et nouvelles problématiques pour la sureté de fonctionnement , Maitrise de risque et de sureté de fonctionnement*. Lambda-Mu 16, Avignon : France, 2008.
- [6] M.OULARBI S.KASSAB. *Elaboration d'un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil, Mémoire d'ingénieur*. École nationale Supérieure D'Informatique (ESI), 2010.
- [7] R.ZITOUNI. *Routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, thèse de magister*. Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, 2006.
- [8] Q.Wang I.BallasinghamI. *wireless sensor networks : Application-centric disign, Geoff V Merrett, and Yen Kheng Tan(Ed)*. ISBN : 978 953 307 321 7,In Tech, 2010.

- [9] S.MOAD. *Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs Sans fil, Rapport de stage.* , université d'IFSIC-Rennes 1, 2007.
- [10] K. Holger A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Wiley,. 5, 6, 7, 14, 20, 21. 2005.
- [11] K. BOUCHAKOUR. *Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil :Protocole KhLCH (K hop Layered Clustering Hierarchy)*. 2012.
- [12] A. MAKHOUL. *Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données. Thèse de Doctorat en Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (SPIM)*. Université de Franche-Comté (LIFC), 2008.
- [13] Y.YOUNES. *Réseaux de capteurs :Minimisation d'énergie dans un réseau de capteur sans fil, thèse de magister.* université mouloud Maameri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [14] Y. SANKARASUBRAMANIAM W. Su, I. F. AKYILDIZ and E. CAYIRICI. *ASurvey on sensor networks*. Commun. ACM, pp. 102-114, August 2002.
- [15] S .Sentilles. *Architectures logicielles pour capteur sans fil en réseau, rapport de recherche,* université de pau et des pays de l'Adour, August 2002.
- [16] W. BECHKIT. *Un nouveau protocole de routage avec conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique,*. École nationale Supérieure d'Informatique, 2009.
- [17] M. Lehsaini. *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application application à la domotique domotique.* Thèse de Doctorat (Spécialité Informatique), Université de Franche-Comté des Sciences et Techniques, 2009.
- [18] H.Balakrishnan A.Chandrakasan, W.Heinzelman. *Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks*. Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, 2000.
- [19] K. BEYDOUN. *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. Thèse de doctorat U.F.R des sciences et techniques.* l'université de Franche-Comté, 2009.
- [20] A. Levesque K. Pahlavan. *Pahlavan and A. Levesque. Wireless Information Networks.* John Wiley and Sons, Inc, New York, 1995.

- [21] N. THEPVILOJANAPONG. *A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks. Thèse de doctorat.* Département Information et Ingénierie de Communication, Université de Tokyo, Japan, Decembre 2005.
- [22] A. Al KARAKI E.KAMAL. *Routing techniques in wireless sensor networks : A Survey .magazine : IEEE communication,vol 11 N6, pp.6.28.* microStrain, Inc, 2004.
- [23] R.JURDAK. *wireless Ad hoc and sensor networks A Cross-layer design perspective.* university college Dublin, 2007.
- [24] J. Bacon E. Yoneki. *A survey of wireless sensor network technologies : Research trends and middleware's role, Technical Report, No. 646.* Computer Laboratory, UCAMCL-TR-646 ISSN 1476-2986, Septembre 2005.
- [25] W. Heinzelman S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh. *Taxonomy of wireless micro-sensor network models.* ACM Mobile Computing and Communication Review, Vol. 6, No. 2,pp. 28-36, 2002.
- [26] K. Akkaya M. Younis. *A survey on routing protocols for wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349.* 2005.
- [27] J. KULIK W-R. HEINZELMAN and H. BALAKRISHNAN. *Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pages 174-185, Seattle.* Washington, USA, Août 1999.
- [28] R. GOVINDAN C. INTANAGONWIWAT and D.ESTRIN. *Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking pages 55-67.* Boston, USA, Août 2000.
- [29] M. TALBI Saïd. *Développement d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs, mémoire de magistère,.* Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, 2008.
- [30] Y. SANKARASUBRAMANIAM I-F. AKYILDIZ, W. SU and E. CAYIRCI. *Wireless sensor networks : a survey,.* Computer Networks (Elsevier) Journal,38(4) :393-422, Mars 2002.
- [31] B. KRISHNAMACHARI D. ESTRIN and S.WICKER. *Modelling data-centric routing in wireless sensor networks,.* In Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2002.

- [32] V. AILAWADHI and G-J. POTTIE V. AILAWADHI, J. GAO. *Protocols for self-organization of a wireless sensor network.*,. IEEE Personal Communications,7(5) :16-27, 2000.
- [33] M. T.Thai F.Wang. *Coverage problems in wireless sensor networks : designs and analysis.*,. International Journal of Sensor Networks, Vol. 3, No. 3, p. 191-200, 2008.
- [34] Y. Bejerano S. Sarkar, G. S. Kasbekar. *Lifetime and Coverage Guarantees Through Distributed Coordinate-Free Sensor Activation* ,ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Vol. 19, no. 2. 2011.
- [35] C. E. Perkins E. M. Royer, S. R. Das. *Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing.* In *IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-05.txt.En ligne.* 2000.
- [36] J-H. CHANG L.TASSIULAS. *Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks.* In *Proceedings IEEE, INFOCOM 2000. 9th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, volume 1,*. 2000.
- [37] R. SHAH J-M. RABAEY. *Energy aware routing for low energy ad-hoc sensor networks.* In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), volume 1,*. 2002.
- [38] M. ACHIR L. OUVRY. *A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-path source routing protocol (mpsr).* In *ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE),.* Ile de la Réunion, France, Avril 2005.
- [39] T-F. ABDELZAHER W-H. KWON, H-S. KIM. *Minimum energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks.* In *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), volume 7, pages 193-204,*. New York, USA, 2003.
- [40] A.Kemal M.Younis. *A Survey on routing Protocols For Wireless Sensor Networks,Elsevier Ad Hoc Network Journal ,Vol 3/3 pp. 325-349,*. 2005.
- [41] M. A. Razzaque C. S. Hong. *A Low Overhead, Energy Efficient, Sink-initiated Multipath Routing Protocol for Static Wireless Sensor Networks,*. Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University, Suwon, South Korea, 2009.
- [42] S. PARK M-B. SRIVASTAVA C. SCHURGERS, V. RAGHUNATHAN. *Energy-aware wireless microsensor networks.* *IEEE Signal Processing Magazine*,19(2) :40-50, ,. Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University, Suwon, South Korea, Mars 2002.

- [43] S. PARK-M-B. SRIVASTAVA C-G. CASSANDRAS, S. ZHUANG. *Optimal dynamic voltage scaling for wireless sensor networks with real-time constraints. In Proceedings of SPIE Conference on Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI, pages 8-16 ,. Octobre 2005.*
- [44] F.Zaho D.Shepherd, S.Kumar. *Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks ,IEEE Signal Processing Magazine ,. March 2002.*
- [45] S.Lindsey C.S.Raghavendra. *PEGASIS :power efficient gathering in Sensors Information Systems .IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems,vol.13,no.9,pp.924-953,. September 2002.*
- [46] A.Manjeshwar et D.P.Agrawal. *APTEEN :A Hybrid Protocol For Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensors Networks ,16^{ème} Colloque International sur le traitement paralléle et distributes (IPDPS-02),. 2002.*
- [47] A.EL JARDALI M.U.A.S.G.J.DECHENE. *A Survey of Clustering Algorithms For Wireless Sensor Networks. 2007.*
- [48] A.Abassi et M.Younis. *A Survey on clustering algorithm for wireless sensor networks. 2007.*
- [49] N.WANG H.ZHU. *An Energy Efficient Algorithme Based on LEACH Protocol, International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. 2012.*
- [50] D. P. Agrawal A.Manjeshwar. *TEEN : A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IEEE Computer Society. Washington, DC, USA., 2001.*
- [51] O. Younis and S. Fahmy. Heed. *A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Trans. Mob. Comput., 3(4) :366-379,. 2004.*
- [52] R. Sheikhpour S. Jabbehdari. *A Two-Level Cluster based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks, International Journal of Advanced Science and Technology, Vol.45. August 2012.*
- [53] A. Mellouk N. Badache M. Aissani and M. Boumaza. *A Novel Approach for Void Avoidance in Wireless Sensor Networks. Int'l Journal of Communication Systems (IJCS), John Wiley and Sons Editions, vol. 23(8), pp. 945-962. 2010.*
- [54] A.P. Chandrakasan W. Heinzelman and H. Balakrishnan. *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, In IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670. 2002.*

- [55] A. E. Kamal J. N. AlKarak. *Routing Techniques in Wireless Sensor Network : A Survey*
Dept. of Electrical and Computer Engineering Iowa State University, Ames, Iowa 50011.
2005.

- [56] X. et al Ji. *Sensor Positioning in Wireless Ad ?hoc Sensor Networks with Multidimensional*
Scaling , Proc. Infocom. 2004.

Résumé

le déploiement des nouvelles technologies a poussé les concepteurs de réseaux informatiques à élaborer une nouvelle architecture de réseau qui répond aux exigences des utilisateurs en terme de coût, de faciliter le déploiement et de mobilité, ce sont les réseaux de capteurs sans fil, généralement utilisés pour recueillir des informations dans des milieux hostiles et les transmettre à un point de collecte qui est la station de base (sink), pour garantir une bonne transmission de données depuis les nœuds source jusqu'à la station de base avec une consommation minimum en énergie, et ainsi fournir une longue vie au réseau nécessite un bon mécanisme de traitement d'énergie. Dans ce mémoire nous avons comme but d'étudier la problématique du routage hiérarchique sous contrainte énergétique des nœuds capteurs et la proposition d'une solution efficace, sachant que le clustering est une architecture bien adaptée aux réseaux de capteurs sans fil avec le découpage du réseau en groupes où chaque groupe est géré par un chef de groupe (cluster head) qui transmet les données reçues des nœuds capteurs à la station de base après les avoir agrégés. Notre approche est basée sur le clustering dynamique avec une communication multi-saut qui est gérée par des nœuds sélectionnés par la station de base selon leur distance par rapport à cette dernière et leur niveau d'énergie. Les résultats de simulation ont montré que notre approche LEACH-LR est plus performante que LEACH et LEACH-R.

Mots-clés : Réseau de capteur sans fil, clustering dynamique, routage hiérarchique, multi-saut LEACH R, Énergie.

Abstract

deployment of new technologies, to push the originators of data-processing networks to work out a new network architecture that guarantees the requirements of the users in terms of cost, to facilitate deployment and mobility, they are wireless sensors networks, generally used to collect information in hostile environments and to transmit them to a point of collection which is the base station (sink), to guarantee good data transmissions from the source nodes to the basic station with a minimum consumption of energy, In this paper we aim to discuss the problems of the hierarchical routing under energy constraint of the sensor nodes and to propose an effective solution, knowing that the clustering is an architecture well adapted to the networks of wireless sensors networks with the network division in groups where each group is managed by a team leader (cluster head) which transmits the data received from the nodes sensors to the base station after having to aggregate them. Our approach is based on the dynamic clustering with a communication multi-hop which is managed by nodes selected by the base station according to their distance compared to the latter and their energy level. Results of simulation in shown that our approach LEACH-LR improves well LEACH and LEACH-R.

Keywords : Wireless sensor networks, dynamic clustering, hierarchical routing, multi-hop, LEACH R, Energy.