

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 Fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master recherche en  
Informatique

Spécialité : Réseaux et Systèmes Distribués

THÈME

---

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

---

Réalisé par :

M<sup>r</sup> ACHOUR Yazid.  
M<sup>r</sup> AZIB Mohand Larbi.

Devant le jury composé de :

Président :	D <sup>r</sup> OMAR Mawloud.
Examinatrice :	M <sup>me</sup> KHOULALENE Nadjjet.
Examinateur :	M <sup>r</sup> LARBI Ali.
Promoteur :	M <sup>r</sup> MIR Foudil.

PROMOTION 2012

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail  
À mes chers parents, qui sont la cause de mon existence dans cette vie,  
pour leur soutien, leur patience et leur amour qui m'ont donné la force pour continuer  
mes études  
À mes frères Salim, Nadjim et Adel à qui je souhaite une bonne continuation dans ses  
études  
À tous mes meilleurs amis, dont la liste est longue du groupe de choc.  
À toute ma grande famille, à tous mes amis et à tous mes enseignants*

***Yazid***

*À mes très chers parents,  
À mes frères et sœurs, mes grandes mères,  
À ma précieuse famille, mes cousins et cousines, Oncles et tantes,  
À mes amis et collègues,  
Et à toutes les personnes que j'ai connues et qui m'ont aidées, un grand MERCI à tous.*

***Mohand Larbi***

## Remerciements

**E**N tout premier lieu, nous remercions Allah le tout puissant, à la sagesse et au savoir infinis, " *Gloire à Toi Nous n'avons de savoir que ce que Tu nous as appris. Certes c'est Toi l'Omniscient, le Sage, le tout miséricordieux le très miséricordieux* " (SOURATE AL-BAQARAH, VERSET 32).

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur **F. MIR** d'avoir joué pleinement son rôle de promoteur en étant à nos côtés tout au long de l'étude de notre projet, ses conseils et orientations nous ont guidés jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions également **Melle S. BOULFEKHAR** du département Informatique pour ses remarques pertinentes qui ont apporté une amélioration certaine à notre travail.

Nous remercions aussi **Dr M.OMAR** de nous faire l'honneur de présider le jury de notre soutenance. Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury constitué de : **Mr A.LARBI** et **Melle N. KHOUELENE** pour avoir accepté la tâche de juger ce travail.

Que tous ceux et toutes celles qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de notre travail trouvent ici nos sincères remerciements et l'expression de notre reconnaissance.

Un grand merci pour nos collègues du Master pour les bons moments que nous avons passé ensemble en particulier les éléments du groupe de choc.

*Zazi & Haha*

## Résumé

Le besoin du monde actuel d'utiliser les technologies de communications sans fil pour recueillir des informations à partir des milieux très sensibles, hostiles et inaccessibles a fait appel au réseau de capteurs. Cependant, l'acheminement des données vers un centre de traitement nécessite des mécanismes de conservation d'énergie ; afin de prolonger la durée de vie du réseau. Cette dissertation a pour but l'étude de la problématique du routage sous contrainte énergétique des nœuds et la proposition d'une solution. La première partie de notre travail consiste à étudier les généralités des réseaux de capteurs et les causes de la consommation énergétique, et les techniques développées pour conserver l'énergie dans le routage. La deuxième partie qui consiste à l'étude des travaux réalisés dans le domaine et les différentes techniques de minimisation de l'énergie, dans la troisième partie nous avons détaillé un état d'art sur les protocoles de clusterisation, à la fin nous avons proposé un protocole nommé MU-EEPSCZ (*Multi-hop Unequal Energie Efficient Protocol Static Clustering Zones*) qui est une amélioration de EEPSC avec un acheminement des données qui s'appuyant sur la technique de routage multi-saut et on utilisant un algorithme de recherche de relais pour minimiser l'énergie de routage, et une amélioration la fonction d'élection des Cluster-Head (*CH*) dans les Clusters.

**Mots clés :** Routage hiérarchique, réseaux de capteurs sans fil, EEPSC, MU-EEPSC Z, relais.

## Abstract

A current world need to use wireless technologies to extracting formation from hostile and critical environment this is the reason to appearance of wireless sensor networks. However, the sensors miniature create trouble for networks life time. However, the routing of data to a central processing requires mechanisms for conservation of energy to the extended lifetime of the network. This dissertation aims to study the problem of routing in energy constraint nodes and the proposed solution. The first part of our work is to study the general sensor networks and the causes of energy consumption, and the techniques developed to conserve energy in routing. The second part is to study the work done in the field and the different techniques of energy minimization, in the third part we have a detailed state of art of the clustering protocols, at the end we proposed a protocol named MU-EEPSCZ (*Multi-hop Energy Efficient Unequal Clustering Protocol Static Zone*) which is improved with a EEPSC routing data based on the technique of multi-hop routing and we use a search algorithm to minimize the energy relay routing, and improved the function of electing Cluster-Head (*CH*) in the clusters.

**Keywords :** hierarchical routing, wireless sensor networks, EEPSC, MU-EEPSC Z relay.

# Table des matières

<b>Dédicaces</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des Acronymes</b>	<b>x</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Etude des réseaux de capteurs sans fils (RCSFs)</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Les réseaux sans fil . . . . .	3
1.2.1 Le réseau avec infrastructure (Cellulaire) . . . . .	4
1.2.2 Le réseau sans infrastructure (Ah doc) . . . . .	5
1.3 Les réseaux de Capteurs sans fil . . . . .	5
1.3.1 Définitions . . . . .	5
1.3.1.1 Définition d'un capteur (sensor) . . . . .	5
1.3.1.2 Architecture d'un nœud capteur . . . . .	6
1.3.1.3 Architecture logicielle . . . . .	7
1.3.2 Types de capteurs . . . . .	8
1.3.3 Caractérisation des réseaux de capteurs . . . . .	8
1.4 Domaines d'application des RCSFs . . . . .	10
1.4.1 Domaines militaires . . . . .	10
1.4.2 Applications environnementales . . . . .	10
1.4.3 Applications sanitaires . . . . .	11
1.4.4 Applications commerciales . . . . .	12
1.4.5 Habitat . . . . .	13
1.5 Communication dans les réseaux de capteurs . . . . .	13
1.5.1 Architecture de communication d'un RCSF . . . . .	13
1.5.2 La pile protocolaire . . . . .	14
1.5.2.1 Le niveau de gestion d'énergie . . . . .	15
1.5.2.2 Le niveau de gestion de mobilité . . . . .	15

---

1.5.2.3	Le niveau de gestion des tâches . . . . .	16
1.5.3	Les types de communications . . . . .	16
1.6	Objectifs des réseaux de capteurs . . . . .	16
1.6.1	Qualité de service . . . . .	17
1.6.2	Diffusion de l'information . . . . .	17
1.6.3	Sécurité . . . . .	17
1.6.4	Couverture . . . . .	17
1.6.5	Routage . . . . .	17
1.7	Contraintes et facteurs conceptuelles des réseaux de capteurs . . . . .	18
1.8	Quelques points de comparaison entre réseau de capteur et réseau Ad hoc . .	20
1.9	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Routage et économie d'énergie dans les RCSFs</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Les Défis du routage dans les réseaux de capteurs . . . . .	22
2.2.1	Le déploiement des capteurs . . . . .	23
2.2.2	Qualité de service (QoS) . . . . .	23
2.2.3	Hétérogénéité des nœuds . . . . .	23
2.2.4	Modèle de livraison de données . . . . .	24
2.2.5	Agrégation fusion de données . . . . .	24
2.2.6	Dynamisme des réseaux . . . . .	24
2.3	Techniques de minimisation de la consommation d'énergie . . . . .	24
2.4	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs . . . . .	26
2.4.1	Classification selon la structure du réseau . . . . .	26
2.4.1.1	Routage à plat (linéaire) . . . . .	27
2.4.1.1.1	Gossiping . . . . .	28
2.4.1.2	Routage hiérarchique . . . . .	29
2.4.1.3	Routage basé sur la localisation géographique . . . . .	32
2.4.2	Classification selon les fonctions des protocoles . . . . .	34
2.4.2.1	Routage basé sur la QoS . . . . .	34
2.4.2.2	Routage basé sur le flux de données dans le réseau . . . . .	36
2.4.2.2.1	L'algorithme max-min zPmin . . . . .	36
2.4.2.3	Routage basé sur multi-chemins . . . . .	38
2.4.2.4	Routage basé sur la négociation . . . . .	40
2.4.3	Classification selon l'établissement de la route . . . . .	42
2.4.3.1	Protocoles proactifs . . . . .	42
2.4.3.2	Protocoles réactifs . . . . .	44
2.4.3.3	Protocoles hybrides . . . . .	45
2.4.4	Classification selon l'initiateur de communication . . . . .	45
2.4.4.1	Communication lancée par la source . . . . .	45
2.4.4.2	Communication lancée par la destination . . . . .	45
2.5	Les métriques de mesure de l'efficacité des protocoles de routage dans les RCSFs . . . . .	46
2.5.1	Le nombre de sauts . . . . .	46
2.5.2	Le temps de traverser un saut . . . . .	47
2.5.3	La différence en temps d'arrivée de deux paquets par saut . . . . .	47

---

2.5.4	La notion du coût . . . . .	47
2.5.5	La notion de puissance . . . . .	47
2.5.6	La notion de coût-puissance . . . . .	48
2.5.7	Le temps du premier nœud à mourir . . . . .	48
2.5.8	Le temps du dernier nœud à mourir . . . . .	48
2.6	Tableau comparatif des protocoles de routage . . . . .	48
2.7	Conclusion . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Etat de l'art sur les protocoles de clustering dans les RCSFs</b>	<b>50</b>
3.1	Introduction . . . . .	50
3.2	Définitions . . . . .	50
3.2.1	Avantages de routage hiérarchique . . . . .	52
3.2.2	Contraintes et facteurs de conception d'un protocole de routage hiérarchique . . . . .	53
3.3	Classification des techniques de clustérisations . . . . .	55
3.3.1	L'architecture du réseau et le modèle de fonctionnement . . . . .	55
3.3.2	Objectifs du processus de clustering . . . . .	56
3.3.3	Taxonomie d'attributs de clustering . . . . .	57
3.3.3.1	Propriétés des clusters . . . . .	58
3.3.3.2	Capacités d'un cluster-head . . . . .	59
3.3.3.3	Processus de clustering . . . . .	60
3.3.3.4	Paramètres de décision . . . . .	61
3.4	Les protocoles de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	62
3.4.1	HEED ( <i>A Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks</i> ) . . . . .	62
3.4.2	EECS ( <i>Energy Efficient Clustering Scheme in WSN</i> ) . . . . .	63
3.4.3	TEEN ( <i>Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol</i> ) . . . . .	64
3.4.4	APTEEN ( <i>Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol</i> ) . . . . .	65
3.4.5	CSOS ( <i>Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks</i> ) . . . . .	66
3.4.6	VGA ( <i>Virtual Grid Architecture routing</i> ) . . . . .	67
3.4.7	EERFC ( <i>Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster-Based Wireless Sensor Networks</i> ) . . . . .	68
3.4.8	EEPSC ( <i>Energy Efficient Protocol Static Clustering</i> ) . . . . .	68
3.4.9	MHEED ( <i>Multi-Hop Hybrid Energy Efficient Distributed clustering</i> ) . . . . .	69
3.5	Tableau comparatif pour les protocoles de clustering . . . . .	71
3.6	Conclusion . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Protocole MUEEPSCZ (<i>Multi-Hop Unequal Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones</i>)</b>	<b>72</b>
4.1	Introduction . . . . .	72
4.2	Description du protocole . . . . .	72
4.2.1	Motivation . . . . .	72
4.2.2	Hypothèses . . . . .	74
4.2.3	Principe . . . . .	74
4.2.3.1	Phase d'installation (Configuration) . . . . .	75

4.2.3.2	Phase d'élection des CHs . . . . .	78
4.2.3.3	Phase de transmission . . . . .	80
4.3	Simulation et analyse de performances . . . . .	82
4.3.1	Aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs . . . . .	83
4.3.2	Le choix de MATLAB . . . . .	83
4.3.3	Métriques de performances . . . . .	84
4.3.4	Étapes de réalisation du simulateur . . . . .	84
4.3.5	Modèle de simulation . . . . .	86
4.3.5.1	Description du système . . . . .	87
4.3.5.2	Modèle d'énergie . . . . .	87
4.3.5.3	Variables descriptives du système . . . . .	88
4.3.6	Evaluation de performances . . . . .	89
4.3.6.1	Moyenne d'énergie consommée (MEC) . . . . .	89
4.3.6.2	Taux moyen de livraison de paquets . . . . .	90
4.3.6.3	Durée de vie du réseau . . . . .	91
4.4	Conclusion . . . . .	92
 <b>Conclusion générale et Perspectives</b>		 <b>93</b>
 <b>Bibliographie</b>		 <b>100</b>



# LISTE DES FIGURES

1.1	Le modèle de réseaux mobiles avec infrastructure[85]. . . . .	4
1.2	Un réseau mobile Ad Hoc. . . . .	5
1.3	Quelques capteurs existants sur le marché. . . . .	6
1.4	Anatomie d'un capteur. . . . .	7
1.5	Les RCSFs dans le domaine militaire. . . . .	10
1.6	Les RCSFs pour la surveillance des lieux hostiles. . . . .	11
1.7	Les RCSFs pour les applications sanitaires. . . . .	12
1.8	Les RCSFs pour les applications commerciales. . . . .	12
1.9	Les RCSFs pour les applications dans l'habitat. . . . .	13
1.10	Architecture de communication d'un RCSF. . . . .	14
1.11	La pile protocolaire utilisée dans les réseaux de capteurs. . . . .	14
2.1	Mécanismes de conservation d'énergie. . . . .	25
2.2	Classification des approches de routage dans les réseaux de capteurs. . . . .	27
2.3	Formation de clusters dans LEACH. . . . .	30
2.4	Fonctionnement de MFR. . . . .	33
2.5	Exemple de grille virtuelle dans GAF. . . . .	34
2.6	Dissémination d'intérêt, construction de gradients et livraison de données de la diffusion dirigée . . . . .	39
2.7	Illustration des échanges de données dans SPIN. . . . .	41
2.8	Diffusion pure et diffusion en utilisant les MPRs dans OLSR. . . . .	43
3.1	Taxonomie d'attributs de clustering dans un RCSF . . . . .	58
4.1	Les différents communications. . . . .	73
4.2	Formation des niveaux. . . . .	76
4.3	Désignation des CH_T . . . . .	77
4.4	Algorithme de la phase d'installation. . . . .	78
4.5	Élection des CHs . . . . .	79
4.6	Algorithme d'élection des CHs et CH_T. . . . .	80
4.7	Ordonancement TDMA . . . . .	81
4.8	Étapes de simulation. . . . .	85
4.9	Déploiement des noeuds. . . . .	86
4.10	Modèle d'énergie. . . . .	87
4.11	Moyenne d'énergie consommée (MEC) . . . . .	90
4.12	Taux moyen de livraison de paquets . . . . .	91
4.13	Durée de vie du réseau . . . . .	92

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	Les différents types de capteurs . . . . .	8
1.2	Comparaison entre le réseau de capteurs et le réseau Ad hoc . . . . .	21
2.1	Synthèse des protocoles . . . . .	48
3.1	Classification des protocoles de routage présentés selon les paramètres de décision et les attributs de clustering. . . . .	71
4.1	Variables descriptives du système. . . . .	88

# Liste des Acronymes

<b>APTEEN</b>	<b>A</b> daptatif <b>T</b> hreshold sensitive <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient sensor <b>N</b> etwork protocol.
<b>CSMA</b>	<b>C</b> arrier <b>S</b> ense <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess.
<b>DD</b>	<b>D</b> irected <b>D</b> iffusion.
<b>DVS</b>	<b>D</b> ynamic <b>V</b> oltage <b>S</b> cheduling.
<b>EAR</b>	<b>E</b> nergy <b>A</b> ware <b>R</b> outing.
<b>FEAR</b>	<b>F</b> air <b>E</b> nergy <b>A</b> ware <b>R</b> outing.
<b>GAF</b>	<b>G</b> eographic <b>A</b> daptive <b>F</b> idelity.
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem.
<b>LEACH</b>	<b>L</b> ow- <b>E</b> nergy <b>A</b> daptive <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy.
<b>MAC</b>	<b>M</b> edium <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol.
<b>MANET</b>	<b>M</b> obile <b>A</b> d hoc <b>N</b> ETwork.
<b>MFR</b>	<b>M</b> ost <b>F</b> orward within <b>R</b> adius.
<b>OMNET++</b>	<b>O</b> bjective <b>M</b> odular <b>N</b> etwork <b>T</b> est-bed in C++.
<b>OSI</b>	<b>O</b> pen <b>S</b> ystems <b>I</b> nterconnection.
<b>AODV</b>	<b>A</b> d hoc <b>O</b> n-demand <b>D</b> istance <b>V</b> ector.
<b>CBRP</b>	<b>C</b> luster <b>B</b> ased <b>R</b> outing <b>P</b> rotocol.
<b>CLB</b>	<b>C</b> lustering based <b>L</b> oad <b>B</b> alancing <b>A</b> lgorithm for <b>S</b> ensor <b>N</b> etworks.
<b>DSDV</b>	<b>D</b> ynamic destination <b>S</b> equenced <b>D</b> istance <b>V</b> ector .
<b>DSR</b>	<b>D</b> ynamic <b>S</b> ource <b>R</b> outing .
<b>GBR</b>	<b>G</b> radient-Based <b>R</b> outing .
<b>GEAR</b>	<b>G</b> eographic and <b>E</b> nergy <b>A</b> ware <b>R</b> outing .
<b>GPSR</b>	<b>G</b> reedy <b>P</b> erimeter <b>S</b> tateless <b>R</b> outing .
<b>GSR</b>	<b>G</b> lobal <b>S</b> tate <b>R</b> outing .
<b>HEED</b>	<b>A</b> <b>H</b> ybrid <b>E</b> nergy-Efficient <b>D</b> istributed clustering approach for ad-hoc sensor networks.
<b>IEEE</b>	<b>I</b> nstitute of <b>E</b> lectrical and <b>E</b> lectronics <b>E</b> ngineers .
<b>ISM</b>	<b>I</b> ndustrial <b>S</b> cientific <b>M</b> edical bands .
<b>MAC</b>	<b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol .
<b>MEMS</b>	<b>M</b> icro- <b>E</b> lectro- <b>M</b> echanical <b>S</b> ystems .
<b>NS-2</b>	<b>N</b> etwork <b>S</b> imulator 2 .
<b>PDA</b>	<b>P</b> ersonal <b>D</b> igital <b>A</b> ssistant .
<b>PEGASIS</b>	<b>P</b> ower-Efficient <b>G</b> Athering in <b>S</b> ensor <b>I</b> nformation <b>S</b> ystem .
<b>QoS</b>	<b>Q</b> ualité de <b>S</b> ervice .
<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality of <b>S</b> ervice .
<b>RCSF</b>	<b>R</b> éseau de <b>C</b> apteurs <b>S</b> ans <b>F</b> il .
<b>SAR</b>	<b>S</b> equential <b>A</b> ssignment <b>R</b> outing .
<b>SB</b>	<b>S</b> tation de <b>B</b> ase .

<b>SPIN</b>	<b>S</b> ensor <b>P</b> rotocols for <b>I</b> nformation via <b>N</b> egotiation .
<b>TDMA</b>	<b>T</b> ime <b>D</b> evision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess .
<b>VCA</b>	<b>A</b> n <b>E</b> nergy- <b>E</b> fficient <b>V</b> oting <b>C</b> lustering <b>A</b> lgorithm .
<b>WCA</b>	<b>W</b> eighted <b>C</b> lustering <b>A</b> lgorithm .
<b>QdS</b>	<b>Q</b> ualité <b>d</b> e <b>S</b> ervice.
<b>RCSF</b>	<b>R</b> éseau de <b>C</b> apteurs <b>S</b> ans <b>F</b> il.
<b>RR</b>	<b>R</b> umor <b>R</b> outing.
<b>TCP</b>	<b>T</b> ransport <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol.
<b>TSRP</b>	<b>T</b> abu <b>S</b> earch <b>R</b> outing <b>P</b> rotocol for wireless sensor networks.
<b>UML</b>	<b>U</b> nified <b>M</b> odeling <b>L</b> anguage.
<b>CH_T</b>	<b>C</b> luster <b>H</b> ead <b>T</b> emporaire .
<b>CH</b>	<b>C</b> luster <b>H</b> ead.
<b>CBAH</b>	<b>C</b> luster- <b>B</b> ased <b>A</b> ggregation <b>H</b> euristic .
<b>LA</b>	<b>L</b> local <b>A</b> ggregators.
<b>MA</b>	<b>M</b> aster <b>A</b> ggregators.
<b>EEPSC</b>	<b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>P</b> rotocol <b>S</b> tatic <b>C</b> lustering .
<b>MUEEPSCZ</b>	<b>M</b> ulti- <b>H</b> op <b>U</b> nequal <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>P</b> rotocol <b>S</b> tatic <b>C</b> lustering <b>Z</b> ones.

# Introduction générale

Les progrès technologiques dans les domaines de la microélectronique, des communications sans fil, couplés aux efforts de miniaturisation et la réduction des coûts de production des composants électroniques, ont permis le développement de nouvelles générations de réseaux sans fils. Ces derniers offrent beaucoup d'avantages notamment en termes de déploiement. Cependant, de nouveaux problèmes surgissent qui rendent les réseaux sans fils moins fiables que les réseaux filaires. Aussi de nouvelles techniques doivent être mises en œuvre pour pallier ces problèmes. Des réseaux pour téléphones mobiles aux réseaux locaux sans fil en passant par les réseaux ad-hoc, la recherche aujourd'hui s'est beaucoup focalisée sur les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network - WSN). Ceux-ci sont composés d'un grand nombre de nœuds communicants et distribués sur une zone donnée afin de mesurer une grandeur physique ou surveiller un évènement. Dans un tel réseau, chaque nœud est un dispositif électronique qui possède une capacité de calcul, de stockage, de communication et d'énergie.

Les caractéristiques particulières des WSNs modifient les critères de performances par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. Dans les réseaux locaux filaires ou les réseaux cellulaires, les critères les plus pertinents sont le débit, la latence et la qualité de service car les nouvelles activités telles que le transfert d'images, le transfert de vidéos, et la navigation sur Internet requièrent un débit important, une faible latence, et une bonne qualité de service. En revanche, dans les réseaux de capteurs conçus pour surveiller une zone d'intérêt, la longévité du réseau est fondamentale. De ce fait, la conservation de l'énergie est devenue un critère de performance prépondérant et se pose en premier lieu tandis que les autres critères comme le débit ou l'utilisation de la bande passante sont devenus secondaires.

La technique des WSNs peut être appliquée dans de nombreux domaines : surveillance des déplacements des véhicules en zone hostile, observation de la vie des espèces rares, surveillance de la structure des infrastructures, optimisation de traitement pour les patients etc. Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple

les routeurs dans les réseaux filaires). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination.

L'objectif de notre travail est de traiter le problème du routage dans les réseaux de capteurs, en minimisant la consommation d'énergie et l'amélioration de durée de vie du réseau. Pour cela, nous avons étudié les approches de routage sous contraintes énergétique proposé dans la littérature, ainsi des critiques et des analyses sont apportées aux techniques adoptés dans les protocoles étudiés, particulièrement les techniques adoptées dans les protocoles de routage hiérarchique.

Ce document est organisé comme en quatre chapitres :

Dans le chapitre 1, nous apportons, dans un premier temps, une description des réseaux sans fil. Dans un second temps, seront données les définitions des réseaux de capteurs, leurs principales caractéristiques et contraintes, ainsi que les domaines d'application.

Le chapitre 2 est consacré au routage dans les RCSFs. Les facteurs influant sur la conception des protocoles de routage, les différentes classes de ces protocoles ainsi qu'une étude de quelques protocoles à basse consommation d'énergie sont présentés.

Le chapitre 3 s'intéresse de près à l'étude des techniques de clustering ainsi que les protocoles utilisant cette technique là.

Le chapitre 4 est consacré au protocole de routage amélioré " MUEEPSCZ " (*Multi-Hop Uniquial Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones*) proposé comme solution à la problématique de routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil selon l'approche de clustering . tout en détaillant son principe de fonctionnement, puis ses performances en le comparant avec le protocole EEPSC (Energy Efficient Protocol Static Clustering)[88].

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés ainsi des perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

# ETUDE DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FILS (RCSFs)

---

## 1.1 Introduction

Les succès réalisés avec les technologies sans fil (WiFi, Bluetooth, Ad hoc. . . etc.) n'ont pas été le but final des chercheurs dans le domaine des réseaux et de la communication ; mais des initiatives aux autres recherches, réalisations beaucoup plus pertinentes, très appréciables avec des coûts d'achat et de déploiement peu onéreux en utilisant des puces électroniques miniatures appelées capteurs. Cependant, la miniaturisation de ces dispositifs reste toujours un problème important vu leur énergie et leur ressources relativement faibles. En effet, les nœuds (les capteurs) déployés forment un réseau appelé réseau de capteurs sans fil doivent capter des informations sur l'environnement, traiter les données et communiquer sur le réseau sans fil avec de possibles contraintes, tout en consommant aussi peu d'énergie que possible.

Le présent chapitre s'inscrit dans le contexte d'une étude globale sur les réseaux de capteurs, leurs utilités et les contraintes régissant ces réseaux.

## 1.2 Les réseaux sans fil

Les réseaux sans fil se divisent en deux catégories, le réseau avec infrastructure et le réseau sans infrastructure ;

### 1.2.1 Le réseau avec infrastructure (Cellulaire)

Un réseau mobile avec infrastructure est composé de sites mobiles. Il permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Dans cette classe, nous distinguons deux ensembles d'entités distinctes : les sites fixes d'un réseau de communication filaire classique (wired network) et les sites mobiles (wireless network) [35]. Certains sites fixes, appelés stations de support mobile (Mobile Support Station) ou stations de base (SB), sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites ou les unités mobiles (UM) localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule (voir figure 1.1).

chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, qui se caractérise généralement par sa fiabilité et son débit élevé. Par contre, les liaisons sans fil ont une bande passante limitée qui réduit sévèrement le volume des informations échangées [23].

Dans ce modèle, une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée. L'autonomie réduite de sa source d'énergie, lui occasionne de fréquentes déconnexions du réseau ; Sa reconnexion peut alors se faire dans un nouveau environnement voire dans une nouvelle localisation [85].

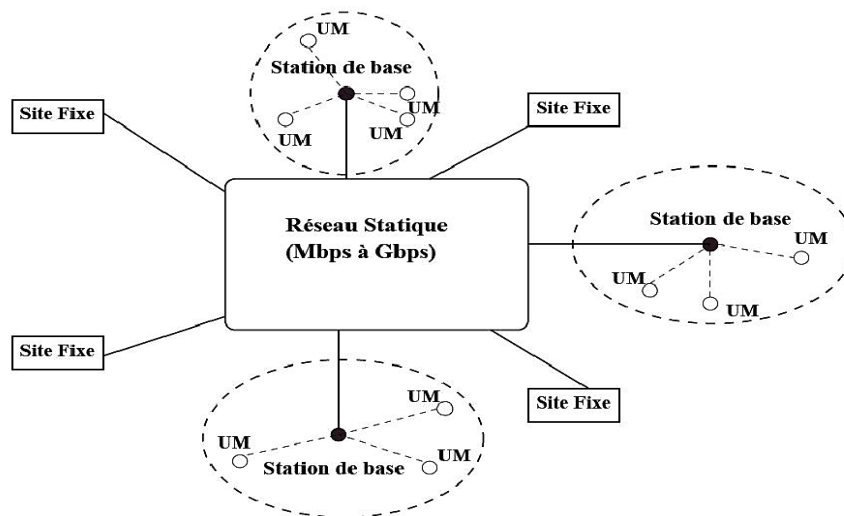


FIGURE 1.1 – Le modèle de réseaux mobiles avec infrastructure[85].



## 1.2.2 Le réseau sans infrastructure (Ah doc)

Le modèle de réseau sans infrastructure préexistante ne comporte pas l'entité site fixe, tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil. L'absence d'infrastructure ou de réseau filaire des stations de base oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau.

Le groupe MANET (Mobile Ad hoc NETWORK) de l'IETF (Internet Engineering Task Force) fournit une définition plus précise en introduction de la RFC 2501 [39] : Un réseau Ad Hoc comprend des plates-formes mobiles appelées nœuds qui sont libres de se déplacer sans contrainte. Un réseau ad hoc est donc un système autonome de nœuds mobiles. Ce système peut fonctionner d'une manière isolée ou s'interfacer à des réseaux fixes au travers des passerelles.

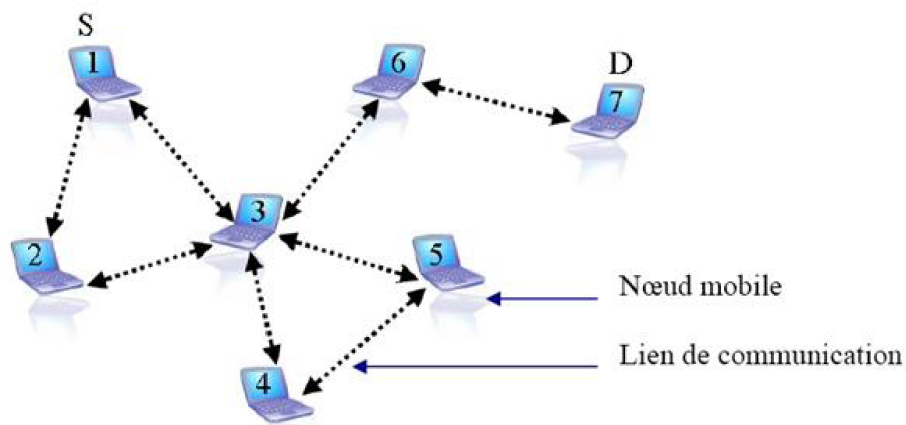


FIGURE 1.2 – Un réseau mobile Ad Hoc.

## 1.3 Les réseaux de Capteurs sans fil

### 1.3.1 Définitions

#### 1.3.1.1 Définition d'un capteur (sensor)

Aujourd'hui, le mot "capteur" a pris de nombreux sens différents. Lorsque nous l'évoquons, nous désignerons un objet pouvant relever une donnée de l'environnement (un capteur au sens premier du terme)[10]. Un capteur est un petit appareil autonome, capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat telles que la température, l'humidité, mesurer l'intensité lumineuse ou sonore, et il sert aussi à détecter, sous forme de

signal souvent électrique, un phénomène physique afin de le représenter [26]. Les capteurs sont dotés d'une batterie, capables de communiquer entre eux et de détecter des événements s'ils se trouvent à l'intérieur de leur rayon de perception.

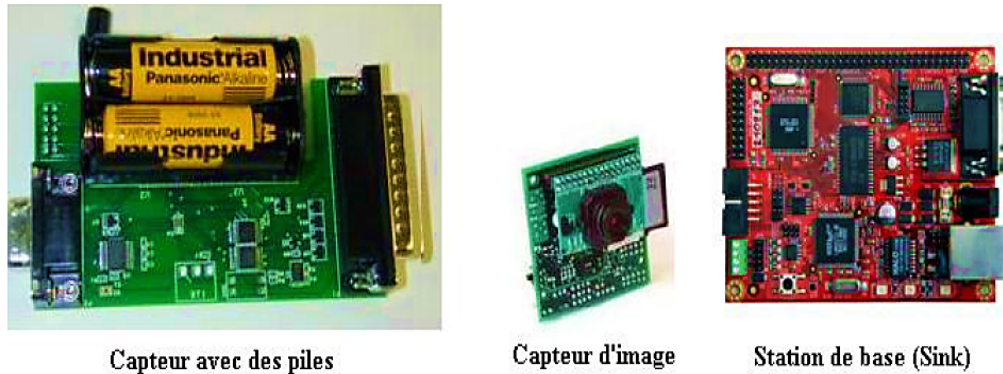


FIGURE 1.3 – Quelques capteurs existants sur le marché.

### 1.3.1.2 Architecture d'un nœud capteur

Cet appareil est un assemblage de quatre composants principaux représentés dans la figure 1.4, unité de capture (Sensing Unit), une unité de traitement (Processing Unit), une unité de communication (Transceiver Unit) et une unité d'énergie (Power Unit) ainsi que trois autres composants additionnels sont envisageable selon le domaine d'application tels qu'un système de localisation (Location Finding System), un mobilisateur (Mobiliser) et un générateur d'énergie (Power Generator)[5].

- **Unité de capture (Sensing Unit)** : Elle permet de capter le phénomène observé et le convertir depuis un signal analogique en un numérique. Il sera, ensuite, fourni à l'unité de calcul ;
- **Unité de traitement (Processing Unit)** : Elle est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent aux nœuds capteurs de collaborer avec les autres nœuds pour accomplir la requête en question ;
- **Unité de communication (Transceiver Unit)** : Elle est chargée d'exécuter toutes les émissions et les réceptions de données ;
- **Unité de contrôle d'énergie (Power Unit)** : Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur ;

- **Système de localisation (Location Finding System)** : Il fournit des informations sur la localisation requise par les techniques de routage ;
- **Unité de mobilité (Mobilizer)** : Il est appelé si le nœud capteur doit être déplacé pour accomplir la requête à traiter ;
- **Générateur d'énergie (Power Generator)** : Il récupère l'énergie de l'environnement extérieure tel que l'énergie solaire puisque le capteur se laisse pendant des mois et même durant des années sans l'intervention humaine.

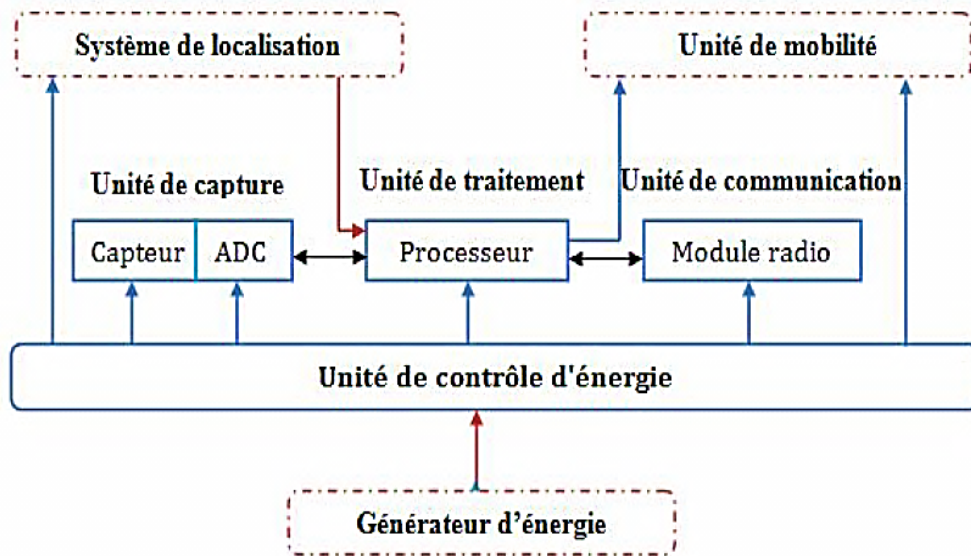


FIGURE 1.4 – Anatomie d'un capteur.

### 1.3.1.3 Architecture logicielle

Un capteur est doté d'un système d'exploitation open source appelé TinyOS qui est une série d'outils développés par l'université de Berkeley et enrichi par une multitude d'utilisateurs. TinyOS est en grande partie s'appuie sur un langage NesC est conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il respecte une architecture basée sur une association de composants. La bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'elle inclut des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. En s'appuyant sur un fonctionnement évènementiel, TinyOS propose à l'utilisateur une gestion très précise de la consommation du capteur et permet de mieux s'adapter à la nature aléatoire de la communication sans fil entre les interfaces physiques.

### 1.3.2 Types de capteurs

Les capteurs sont disponibles en différents modèles et dépendants de l'application à laquelle ils sont destinés. Il existe plusieurs fabricants de capteurs parmi lesquels nous trouvons : Imote IV, Art of Technology et Crossbow [36]. Les différents capteurs : MICA2, Telos B, MICAz, Imote2, etc.

Les composants de chaque capteur sont illustrés dans le tableau 1 :

Propriétés/Type	Btnode 3	Mica 2	Micaz	Telos A
<b>Fabricant</b>	fabricant Art of Technology	Crossbow	Crossbow	Imote IV
<b>Microcontrôleur</b>	Atmel atmega 128L	Atmel atmega 128L	Atmel atmega 128L	Texas Instrument MPS430
<b>Fréquence d'horloge</b>	7.37 MHz	7.37 MHz	4 MHz	8 MHz
<b>RAM (KB)</b>	64+180	4	4	2
<b>ROM (KB)</b>	128	128	128	60
<b>Storage(KB)</b>	4	512	512	256
<b>Radio</b>	chipcon cc1000 315/433/868/916 /MHz 38.4 Kbauds	chipcon cc1000 315/433/868/916 /MHz 38.4 Kbauds	chipcon cc2420 2.4Chz 250 Kbps IEEE 802.15.4	RFM TR 1001 57.6 Kbps 868MHz
<b>Portée maximale(m)</b>	150-300	150-300	75-100	75-100
<b>Connecteur PC</b>	carte (board) programmable	carte(board) programmable	carte (board) programmable	USB
<b>Système d'exploitation</b>	Nut/OS	TinyOS	TinyOS	TinyOS
<b>Energie</b>	2 batteries AA	2 batteries AA	2 batteries AA	2 batteries AA

TABLE 1.1 – Les différents types de capteurs

### 1.3.3 Caractérisation des réseaux de capteurs

La réalisation d'un réseau de capteur utilise les techniques des réseaux Ad hoc. Cependant, les protocoles et les algorithmes proposés dans ce dernier ne conviennent pas aux réseaux de capteurs sans fil. Voici donc quelques caractéristiques spécifiques à ces réseaux :

- **Topologie dynamique des réseaux de capteurs sans fil** : La mobilité continue des nœuds crée un changement dynamique de topologie. Par exemple, un nœud peut rejoindre un réseau, changer de position ou quitter le réseau (suppression de capteurs

à cause de défaillances ou autres choses, etc). Ce déplacement a naturellement un impact sur la morphologie du réseau ;

- **Absence d'infrastructure** : Les réseaux de capteurs en général, se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée à l'exception des réseaux ad hoc. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue ;
- **Un grand nombre de capteurs** : Des réseaux de 10000 nœuds peuvent être envisagés ;
- **Sécurité physique limitée** : Les réseaux de capteurs sans fil mobiles sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé [13] ;
- **Auto déploiement** : Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans l'environnement sans intervention humaine et demeurent sans surveillance pendant longtemps après déploiement ;
- **Auto configuration** : Consiste avant tout à permettre la communication des nœuds, et donc l'affectation d'adresses aux interfaces réseaux, la diffusion des préfixes des sous réseaux et des passerelles d'interconnexion. Il s'agit ensuite de diffuser les informations comme le DNS aux nœuds du réseau [13] ;
- **Auto-organisation** : Cherche à structurer la topologie du réseau en tirant partie des propriétés des nœuds tels que l'énergie résiduelle, la densité, etc. Par exemple, est-il préférable de proposer une architecture à plat du réseau ou au contraire est-il nécessaire de proposer des mécanismes regroupant les nœuds suivant des critères comme les services, les interfaces radio, les capacités, l'énergie disponible, etc. L'auto-organisation doit également répondre à la prise en compte efficace de la dynamique du réseau [11] ;
- **Autogestion** : A pour objectif de proposer une supervision autonome : une fois un réseau spontané auto-configuré et auto-organisé, il est nécessaire de fournir des algorithmes et des protocoles permettant sa surveillance, sa maintenance réactive [11] ;
- **Contrainte d'énergie** : Dans plusieurs applications, les nœuds de capteurs sont placés dans des surfaces distantes, le service du nœud peut ne pas être possible, dans ce cas la durée de vie du nœud peut être déterminée par la vie de la batterie, ce qui exige la minimisation des dépenses énergétiques ;

## 1.4 Domaines d'application des RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21ème siècle [61], Les nombreux projets existants ont le plus souvent attiré à l'observation des zones inaccessibles ou à la surveillance d'environnements sensibles. Il y est essentiellement question de suivi d'objets mobiles (tels que des animaux, des véhicules ou encore des individus). L'observation de cibles fixes est aussi l'un des objectifs de ces réseaux [49]. La recherche dans ce domaine subit actuellement une révolution importante et leurs applications prennent de plus en plus d'ampleur dans plusieurs domaines, nous citons ici quelques domaines très importants :

### 1.4.1 Domaines militaires

Les réseaux de capteurs sans fil sont appliqués avec beaucoup de succès dans la surveillance militaire. Les RCSFs ont contribué dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance du champ de bataille, la reconnaissance des forces d'opposition, l'évaluation des dommages de la bataille et la détection ainsi que la reconnaissance d'attaque à savoir si elle est nucléaire, biologique et chimique. La maîtrise de ces facteurs constitue un point fort et un atout pour les forces militaires.



FIGURE 1.5 – Les RCSFs dans le domaine militaire.

### 1.4.2 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sans fil sont aussi largement utilisés dans le secteur environnemental [84], comme, nous allons le voir ci-dessous :

- La détection de feux de forêts ;

- La détection d'inondations et de tremblements de terre ;
- Le contrôle de l'environnement marin (capteurs acoustiques) ;
- Les études de pollution ;
- La recherche météorologique ou géophysique ;
- Agriculture de précision : On trouve aussi l'utilité de ces réseaux dans la surveillance de niveau de pesticides dans l'eau potable, le niveau d'érosion du sol et le niveau de pollution atmosphérique ;
- L'exploration planétaire.



FIGURE 1.6 – Les RCSFs pour la surveillance des lieux hostiles.

### 1.4.3 Applications sanitaires

Les RCSFs sont récemment très répandus dans le secteur de la santé. Dans certains hôpitaux, ils sont installés pour surveiller des données physiologiques des patients et pour surveiller aussi le comportement des patients et des médecins à l'intérieur d'un hôpital.

Lorent et al [79], décrivent l'application biomédicale qu'ils ont fait sur la rétine artificielle. Dans le projet : les capteurs intelligents et les microsystemes intégrés (SSIM), la puce prosthèse rétine qui est constituée de 100 micros capteurs est construite et implémentée dans l'œil humain. Cette application a permet au patient non-voyants ou à vision limitée de voir ou d'améliorer leur niveau de vision.

Quelques autres applications ont été envisagées à savoir : la surveillance de niveau du glucose, le contrôle des organes, la détection du cancer, etc. L'idée d'intégrer des capteurs biomédicaux sans fil dans le corps humain est prometteuse, bien qu'ils existent beaucoup de défis et de contraintes à prendre au sérieux : le système doit être ultra prudent, sans

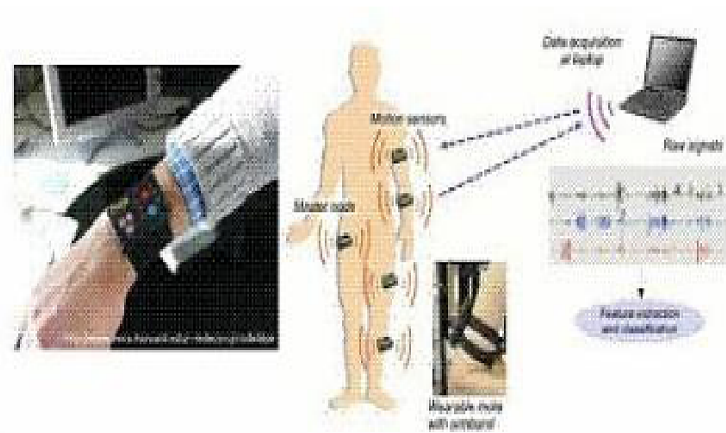


FIGURE 1.7 – Les RCSFs pour les applications sanitaires.

danger sur la santé du patient et stable ; nécessite peut de maintenance.

Avec beaucoup de recherches et de progressions dans ce domaine, un coût de traitement médical peut être réduit et une qualité de vie meilleure.

#### 1.4.4 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré.



FIGURE 1.8 – Les RCSFs pour les applications commerciales.



### 1.4.5 Habitat

Les RCSFs sont déployés pour le contrôle et la détection de problèmes structuraux dans les bâtiments et les immeubles. Ceci facilite la tâche de maintenance des édifices et permet d'empêcher les désastres.

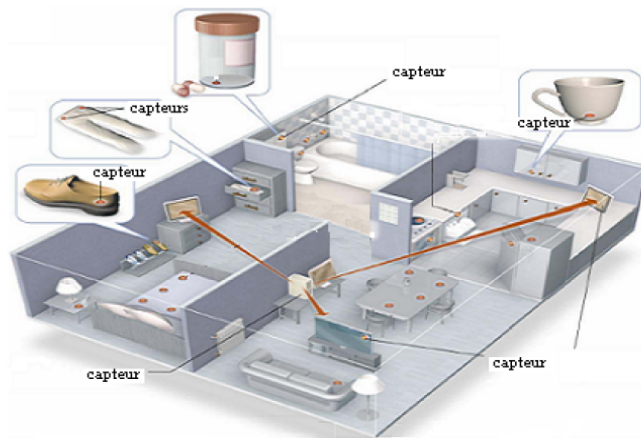


FIGURE 1.9 – Les RCSFs pour les applications dans l'habitat.

## 1.5 Communication dans les réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, en n'ayant aucune information sur la topologie globale même locale du réseau construit. Pour cela, les nœuds capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leur permettre de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, réagir aux données perçues et transmettre ces données via une communication multi-sauts à la destination.

### 1.5.1 Architecture de communication d'un RCSF

Un RCSF est composé d'un ensemble souvent très important de nœuds capteurs. Ces nœuds capteurs sont, soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement (souvent déployés par voie aérienne à l'aide d'avions ou d'hélicoptères) et ils sont organisés en champs " sensor fields " (voir la figure 1.10) [13].

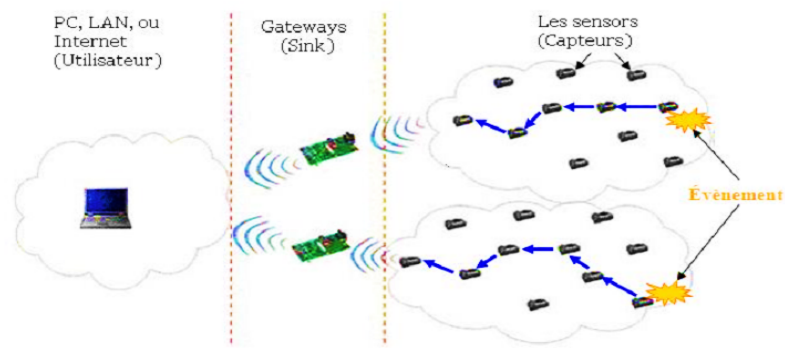


FIGURE 1.10 – Architecture de communication d'un RCSF.

## 1.5.2 La pile protocolaire

En général, un réseau de capteur est relié avec d'autres types de réseaux. Pour que ce réseau puisse communiquer avec eux, il a besoin d'une interface de communication standard. Comme il n'y a aucune pile protocolaire standard pour les réseaux de capteurs, en comparant la pile protocolaire dans l'architecture de réseau de capteurs pour être semblable aux sept couches d'OSI (Open Systems Interconnect) d'architecture de réseau conventionnelle. La pile protocolaire utilisée par le nœud puits ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure ci-dessous (Figure 1.11) reprise depuis [76].

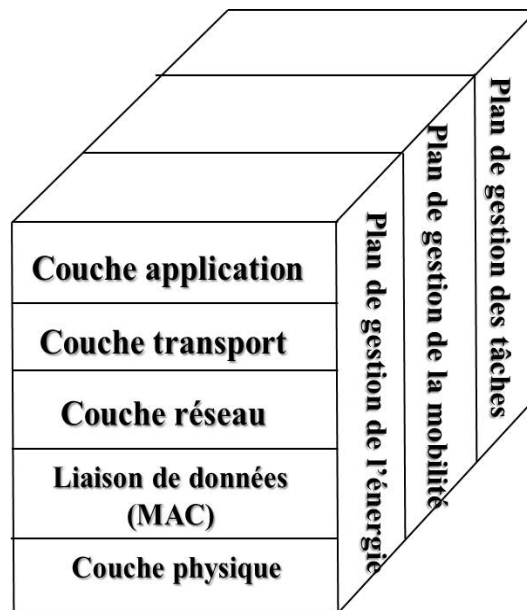


FIGURE 1.11 – La pile protocolaire utilisée dans les réseaux de capteurs.

Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs. Elle est composée de cinq couches : la couche physique, la couche de liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application.

**La couche physique** : doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste.

1. La couche de liaison de données : comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et un taux de collision 8 minimum entre les données diffusées par les nœuds voisins.
2. La couche réseau : s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.
3. La couche transport : quant à elle, sert à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées, particulièrement lors d'une connexion avec Internet.
4. La couche application : suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur cette couche.

En plus de ces cinq couches, la pile protocolaire dans les réseaux de capteurs comporte trois niveaux : le niveau de gestion d'énergie, le niveau de gestion de mobilité et le niveau de gestion de tâches. Ces niveaux sont responsables du contrôle de l'énergie consommée, des mouvements des nœuds et de la distribution des tâches à travers toute la pile protocolaire, ils permettent aux capteurs de coordonner leurs tâches et minimiser la consommation d'énergie [17, 15].

#### 1.5.2.1 Le niveau de gestion d'énergie

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [17].

#### 1.5.2.2 Le niveau de gestion de mobilité

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

une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [17].

### 1.5.2.3 Le niveau de gestion des tâches

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [17].

## 1.5.3 Les types de communications

En général, dans les réseaux de capteurs, deux types de nœuds sont identifiés logiquement : les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteurs), et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds (nœuds de relais ou stations de bases). Les données capturées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi sauts. Cette organisation logique implique quatre types de communications :

- **La communication nœud capteur à un nœud capteur** : Ce type de communication directe est utilisé pour des opérations locales, par exemple pendant 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.
- **La communication nœud intermédiaire à un nœud capteur** : Les requêtes et la signalisation des messages, sont souvent multicast, elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires, pour atteindre un sous-ensemble de nœuds.
- **la communication nœud intermédiaire à un nœud intermédiaire** : La communication entre ces nœuds peut être dans la plupart du temps unicast.

## 1.6 Objectifs des réseaux de capteurs

Recherches dans le domaine des réseaux de capteurs ont soulevés plusieurs problématiques. Parmi lesquelles, nous citons :

### **1.6.1 Qualité de service**

Des protocoles au niveau de la couche MAC devraient être capables d'établir des priorités entre les flux, limiter les pertes de paquets vitaux pour la gestion du réseau.

### **1.6.2 Diffusion de l'information**

Les protocoles de diffusion, conçus pour les réseaux de capteurs, doivent tenir compte de leurs spécificités ainsi que de leurs contraintes intrinsèques imposées. Ainsi, pour concevoir un protocole efficace, il faudrait assurer une couverture maximale des capteurs composant le réseau, minimiser le nombre des réémissions et des réceptions redondantes ainsi que la consommation d'énergie.

### **1.6.3 Sécurité**

Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité, et d'intégrité doivent être mis en place au sein de leur communauté. Les algorithmes de cryptographie conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte des ressources limitées que présentent ces réseaux.

### **1.6.4 Couverture**

La couverture est un paramètre important dans les réseaux capteurs sans fils dans la mesure où elle affecte le résultat de la tâche de perception effectuée 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, on peut réduire la consommation d'énergie, et donc étendre, la durée de vie du réseau.

### **1.6.5 Routage**

Dans ses grandes lignes, la problématique du routage dans les réseaux sans fil ressemble à celle du routage dans les réseaux traditionnels. Il s'agit d'aiguiller les paquets vers leur destination. Pour connaître la topologie du réseau, les nœuds échangent des paquets comportant de l'information topologique. En effet, Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance.

## 1.7 Contraintes et facteurs conceptuelles des réseaux de capteurs

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit :

- **L'environnement** : Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au-delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés, etc. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées [18];
- **Les ressources limitées** : Généralement les nœuds capteurs ont une taille très petite. La miniature des capteurs limite la quantité de ressources qu'il peut contenir. D'où leurs capacités de traitement et de mémoire sont très limitées [5];
- **La scalabilité** : Le nombre de nœuds déployés pour un projet peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le puit " sink " soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues [18];
- **La tolérance de fautes** : Certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes ne doivent pas affecter le fonctionnement de tout le réseau de capteur, c'est le principe de la tolérance de fautes. La tolérance de fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs [5];
- **Les coûts de production** : Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Actuellement un nœud ne coûte souvent pas beaucoup plus que (1\$). A titre de comparaison, un nœud Bluetooth, pourtant déjà connu pour être un système low-cost, revient environ à (10\$) [5];
- **Les médias de transmission** : Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil, Ces liens peuvent être formés par radio, infrarouge ou des média optiques. Cependant, il faut s'assurer de la disponibilité du moyen de transmission choisi dans l'environnement de capture afin de permettre au réseau d'accomplir la totalité de ses tâches. Le choix des liaisons radio est par rapport à l'utilisation de la bande ISM (Industrial, Scientific and Medical) qui offre une licence gratuite (License-free) dans la plupart des pays [5];
- **Agrégation de données** : Dans les RCSF, les données produites par les nœuds capteurs

voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données.

**- Puissance de transmission**

**a- Les ressources limitées** : Généralement les nœuds capteurs ont une taille très petite. Le facteur de forme limite la quantité de ressources qui peut être mise dans ces nœuds. D'où leurs capacités de traitement et de mémoire sont très limitées [6].

**b- La bande passante limitée** : Etant donné le fait que la puissance de chaque capteur est limitée, les nœuds ne peuvent supporter des débits élevés [6].

**- La gestion de l'énergie** : Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie ( $<0.5$  Ampère-heure, 1.2 V). De plus, dans certaines applications, ces nœuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également. Le dysfonctionnement d'un certain nombre de nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseau qui consomment le minimum d'énergie.

Dans les réseaux de capteurs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative, qui influence directement sur la durée de vie du réseau en entier. Pour cela, les concepteurs peuvent, au moment du développement des protocoles, négliger les autres métriques de performances telles que la durée de transmission et le débit, au profit du facteur de consommation d'énergie [43]. En effet, l'énergie totale consommée par un nœud capteur a pour origine trois fonctions principales : la capture, les traitements

et la communication.

1. **Énergie de capture** : Cette tâche est effectuée par le composant de la capture (Fig. 1.2) qui traduit les phénomènes physiques en signal électrique et il peut être digital ou analogique. Il existe plusieurs types de ce composant qui mesurent les paramètres de l'environnement comme la température, le son, l'image, la pression, etc. Les sources de consommation d'énergie dans ces composants peuvent être : l'échantillonnage des signaux, la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le traitement des signaux et la conversion analogique numérique [76]. La consommation d'énergie par ces composants est dépendante de leurs tâches, les capteurs de température ou de tremblement de terre sont moins consommateurs d'énergie par rapport à ceux d'imagerie ou de vidéo [65].
2. **Énergie de traitements** : Cette tâche inclut le contrôle des composants de capture et l'exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement de signaux sur les données collectées. Elle est effectuée par les microprocesseurs. Le choix de ces derniers est en fonction du scénario de l'application, et il fait en général un compromis entre le niveau de performance et la consommation d'énergie [65].
3. **Énergie de communication** : L'énergie de communication représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud [60]. Cette communication est assurée dans la plus part des RCSFs par le support de transmission radio. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par plusieurs facteurs : le type du système de modulation, quantité des données à communiquer, la puissance de transmission (déterminée par la distance de transmission), etc. [65, 38].  
En général, les radios peuvent fonctionner dans quatre modes d'opération différents : transmission 4, réception 5, actif "idle"6 et sommeil 7. Tel que la radio consomme beaucoup plus d'énergie dans les modes transmission et réception. Cependant, le mode actif est également coûteux en énergie. Dans la plupart des cas, la consommation d'énergie est relativement élevée dans le mode actif, puisque ce dernier nécessite que le module radio soit mis sous tension et décode continuellement les signaux radios pour détecter l'arrivée des paquets.

## 1.8 Quelques points de comparaison entre réseau de capteur et réseau Ad hoc

le tableau suivant représente quelques différence entre les réseaux à infrastructure et sans infrastructure :



<b>Réseau de capteurs</b>	<b>Réseau ad hoc</b>
Objectif ciblé	Générique/communication
Les nœuds collaborent pour réaliser un objectif	Chaque nœud a son objectif
Flot de données "many to one"	Flot "any to any"
Très grand nombres de nœuds n'ayant pas tous un ID	Notion d'ID
Energie est un facteur déterminant	Débit est majeur
Utilisation de broadcast	Communication point à point

TABLE 1.2 – Comparaison entre le réseau de capteurs et le réseau Ad hoc

## 1.9 Conclusion

Ce chapitre englobe les concepts fondamentaux sur les réseaux sans fil, Ad hoc et capteurs. Les propriétés des réseaux de capteurs sans fil en flexibilité, prix réduit et facilité de déploiement offrent de nombreuses possibilités de développement dans tous les domaines d'applications. nous distinguons quatre classes d'applications en se basant sur les modes d'acquisition des données capteurs de types : temps, événement et requête.

Par ailleurs, la communication dans les réseaux de capteurs sans fil est particulière puisque elle est en général, basée sur le mode "multicast". Ce mode de communication présente plusieurs inconvénients : une durée de vie du réseau limitée, l'adaptation à l'environnement de déploiement et les contraintes matériels (ressources limités : autonomie d'énergie, mémoire de stockage, capacité de calculs). La durée de vie du réseau est liée à la quantité d'énergie disponible au niveau de chaque nœud capteur. La consommation de cette énergie est gouvernée par plusieurs facteurs que nous développerons dans le prochain chapitre.

---

# ROUTAGE ET ÉCONOMMIE D'ÉNERGIE DANS LES RCSFS

---

## 2.1 Introduction

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

Ce second chapitre, présente l'ensemble des défis qu'il faut prendre en considération lors de la conception d'un protocole de routage pour les RCSFs. Il fournit les classifications des différentes approches de routage avec leurs avantages et leurs inconvénients. Il introduit aussi un état de l'art récent des protocoles de routage à basse consommation d'énergie. Il s'achève par une synthèse de comparaison de ces protocoles en se basant sur quelques métriques telles que l'agrégation de données, mobilité des nœuds, etc.

## 2.2 Les Défis du routage dans les réseaux de capteurs

Comme les réseaux de capteurs imposent des fonctions spécifiques et des contraintes sur les ressources, leur efficacité et surviabilité dépendent considérablement de la qualité de leurs protocoles. Afin de concevoir un protocole de routage efficace, un ensemble de considérations doit être pris en compte. En plus, des facteurs de consommation d'énergie, tolérance aux pannes, topologie et scalabilité, préalablement discutés dans le chapitre précédent, l'opération du routage est contrainte par un ensemble de facteurs indispensables pour qu'une

communication efficace puisse être assurée parmi lesquels nous citons [16] :

### 2.2.1 Le déploiement des capteurs

Le déploiement des nœuds dans les réseaux de capteurs peut être déterministe ou aléatoire. Dans le mode déterministe, les capteurs sont placés manuellement et les données sont toujours routés via un chemin prédéterminé et fixe. Par contre, dans le mode aléatoire (auto-organisé) les nœuds capteurs sont déployés aléatoirement dans le champ de captage, créant ainsi une infrastructure ad hoc [81].

### 2.2.2 Qualité de service (QoS)

Certains types d'application exigent que les données soient délivrées aux destinataires durant certaines périodes, sinon ils sont inutiles, donc pour ce genre d'applications qui sont soumises à des contraintes temporelles, une latence limitée dans les délais de transmission doit être garantie. Comme la conservation d'énergie est une contrainte critique dans plusieurs applications de réseaux de capteurs, alors cette dernière doit être prise en compte en première priorité relativement à la qualité de service. Pour minimiser la dissipation d'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau.

### 2.2.3 Hétérogénéité des nœuds

En général, les réseaux de capteurs sont constitués d'un ensemble de nœuds homogènes ayant les mêmes capacités en termes de calcul, transmission et énergie disponible. Mais selon l'application, les nœuds capteurs peuvent offrir des fonctionnalités particulière telles que l'agrégation, et le relayage avec un autre réseau, en plus du captage en mêmes temps, et avoir ainsi, des capacités spécifique.

L'existence d'ensembles hétérogènes de capteurs, engendre plusieurs questions techniques liées au routage de donnée. En effet quelques applications imposent un mélange de capteurs divers pour assurer différentes fonctionnalités du réseau. Ces capteurs spéciaux peuvent être déployés indépendamment comme ils peuvent inclure des fonctionnalités différentes ; mêmes le captage et la délivrance des données peuvent être produits par ces capteurs à différents taux. Par exemple les algorithmes de routages hiérarchiques exigent qu'un cluster-Head doive être plus puissant que les capteurs normaux, en termes d'énergie, bande passante et mémoire, car il est le seul responsable de l'agrégation des données captées et leurs transmissions vers la station de base [4].

### 2.2.4 Modèle de livraison de données

Un autre facteur important qui doit être pris en compte lors de la conception d'un protocole de routage, est celui de délivrance de données captées ; selon l'application, ce dernier peut être continu, orienté évènement, orienté requête, ou hybride. Celui de renvoi orienté évènement, ou requête est convenable aux applications dont le temps de réponse est critique ; dans ces deux derniers modèles la réaction des nœuds capteurs aux évènements produits dans le champ de captage ou aux demandes de la station de base, doit être immédiate. La combinaison des trois modèles précédents donne naissance à un autre mode de transmission appelé le modèle hybride [4].

### 2.2.5 Agrégation fusion de données

Un nouveau paradigme, que les protocoles de routages doivent prendre en compte, est l'agrégation de données. Ce dernier consiste en un ensemble de méthodes automatisées qui combinent les données provenant des différents nœuds sources en un ensemble d'informations significatives. Cette technique permet d'éliminer la redondance dans les données capturées, et minimiser le nombre de transmissions possibles, afin d'économiser la quantité d'énergie consommée [4, 72].

### 2.2.6 Dynamicité des réseaux

En général, les réseaux de capteurs sont supposés statiques. Dans ce cas, les protocoles de routage considèrent les composants de ces derniers comme stationnaires, comme il est le cas dans les réseaux de surveillance de forêts, généralement utilisés pour la prévention contre les incendies. Cependant, l'aspect dynamique de l'un des composants des réseaux de capteurs, est nécessaire dans plusieurs applications, comme la mobilité des capteurs ainsi que le nœud puits. Dans ce type de réseaux, le routage de données est une tâche complexe, car le facteur de stabilité de route choisie devient un facteur d'optimisation important, en plus de l'énergie consommée la bande passante disponible, etc. De plus, la surveillance des phénomènes dynamiques exige l'envoi des rapports périodiques, ce qui implique la génération d'un trafic considérable à router vers le nœud puits [16, 72].

## 2.3 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie

Après avoir fait une description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSF , nous allons présenter dans cette section (figure 2.1) une vue globale des différentes

techniques utilisées pour minimiser cette consommation [89]. La minimisation d'énergie intervient pendant les trois opérations citées dans la figure ci-dessus qui sont : La capture, le traitement et la communication. Pour chaque opération, on peut envisager une solution d'économie d'énergie.

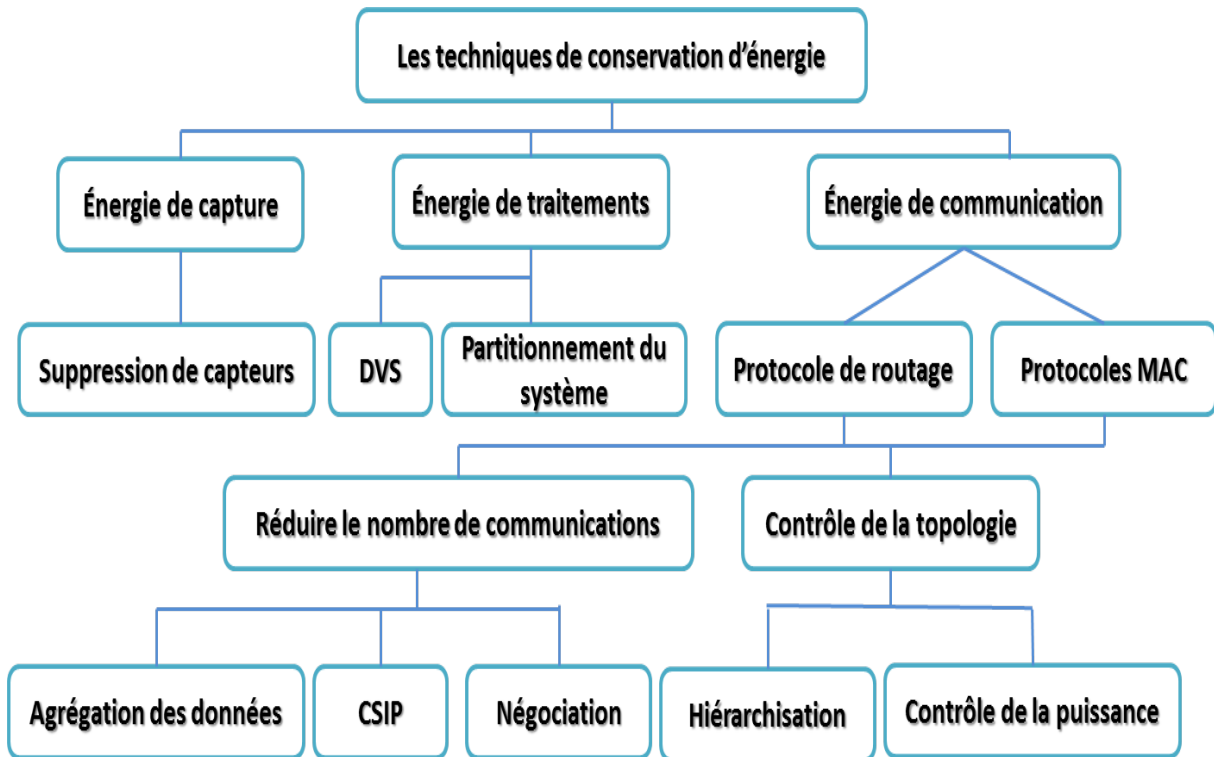


FIGURE 2.1 – Mécanismes de conservation d'énergie.

- **Énergie de capture** : L'utilisation des intervalles de temps réduits pour la capture est une solution pour la conservation d'énergie ;
- **Energie de traitement** : La conservation d'énergie pendant l'opération de traitement et de calcul peut être réalisée par deux approches :
  1. **Approche DVS** (*Dynamique Voltage Scaling*) : Elle 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 ;
  2. **Approche de partitionnement du système** : Elle consiste à éliminer le traitement intensif et prohibitif à un centre de traitement distant (capteur ou sink) qui n'a pas une contrainte d'énergie ou la répartition des calculs complexes parmi de nombreux capteurs.
- **Energie de communication** : La minimisation de la consommation d'énergie Pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour La couche

réseau et la couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : agrégation de données, négociation et CSIP (Collaborative Signal and Information Processing). Cette dernière technique est une discipline qui combine plusieurs domaines [67] : la communication et le calcul à basse puissance, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions, ces techniques ont pour but de réduire le nombre d'émission/réception des messages.

Il y a d'autres techniques dites de contrôle de la topologie pour permettre l'ajustement de la puissance de transmission et le regroupement des nœuds capteurs.

## 2.4 Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont déployés d'une manière dense dans un champ de capture proche ou à l'intérieur du phénomène perçu. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi-sauts sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant [16, 81, 4] :

- la structure du réseau ,
- les fonctions des protocoles (protocols operations),
- l'établissement de route,
- l'initiateur de communication.

La figure 2.2 montre la classification des différentes approches de routage dans les RCSFs selon les critères cités précédemment :

### 2.4.1 Classification selon la structure du réseau

La structure du réseau peut jouer un rôle significatif dans le fonctionnement d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs, les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories : protocoles à plat (Flat based routing), protocoles hiérarchiques (Hierarchic based routing/Clustering based routing) et protocoles basés sur la localisation géographique (Location based routing). Dans cette section nous détaillons ces classes.

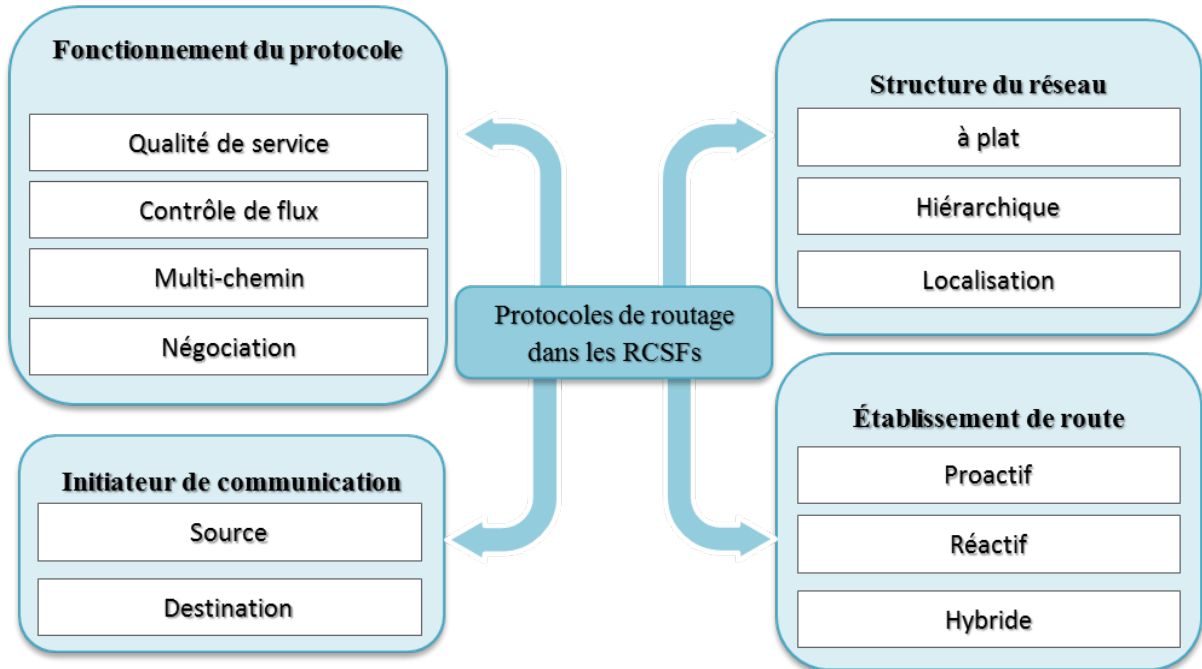


FIGURE 2.2 – Classification des approches de routage dans les réseaux de capteurs.

#### 2.4.1.1 Routage à plat (linéaire)

Dans cette catégorie les nœuds sont considéré homogènes et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire, seul les nœuds puits est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers le centre de transmission. Cette catégorie des protocoles de routage est celle des protocoles de routage à plat multi-sauts (multihop flat routing) dont les protocoles sont basés sur le principe centrés données "data-centric" où tous les nœuds ont le même rôle et ils collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. En raison du grand nombre de tels nœuds, il n'est pas faisable d'affecter un identificateur global à chaque nœud. Pour pallier cette lacune, un système de dénomination par attribut (attribute values) est nécessaire pour spécifier les propriétés des données [76]. La figure montre le principe de fonctionnement du routage à plat.

- **Flooding**

Le protocole Flooding (Inondation) [6] est une technique classique pour L'acheminement par relais des données dans les RCSFs. Dans cette approche, chaque nœud recevant un paquet de données le diffuse à tous ses nœuds voisins, jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint (inondation de tout le réseau). Bien qu'il ne soit pas un protocole économe en énergie pour les RCSFs mais sa présentation est indispensable, car il est l'un des premier protocoles proposés pour les RCSFs, ainsi qu'il est considéré comme une base pour les différents protocoles minimisant la consommation d'énergie pour les RCSFs.

**2.4.1.1.1 Gossiping** Le Gossiping [5] ou Bavardage en français est une version légèrement améliorée du Flooding ou un nœud recevant un message ne le diffuse pas à tous ses voisins, mais il le transmet à un seul, sélectionné aléatoirement. En effet, chaque nœud capteur dans le réseau sélectionne aléatoirement un nœud parmi ses voisins pour lui transmettre les données reçues, une fois le nœud voisin reçoit ces données, il choisit un autre nœud d'une façon aléatoire pour lui expédier ces données à son tour, jusqu'à ce que les données atteignent la station de base.

Le bavardage évite le problème de l'implosion avec le choix probabiliste des nœuds pour envoyer le paquet plutôt que de le diffuser. Cependant, cette méthode génère un retard dans la propagation des données dans les nœuds.

#### Avantages

- Scalabilité : les réseaux à plat sont scalables du fait que chaque nœud participe également à la tâche de routage et puisque les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- Simplicité : les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, puisqu'il est possible d'établir le réseau sans overhead 2 ainsi que nous n'avons aucun besoin d'algorithmes complexes pour faire le choix d'un cluster-head.
- L'agrégation des données utilisée par les protocoles de ce type conserve une quantité considérable d'énergie.
- Le fait que les nœuds du réseau d'un réseau à plat ont le même rôle et les mêmes propriétés, les nœuds ont besoin juste de connaître seulement leurs voisins, rend ce protocole passable à l'échelle.
- La possibilité de réaliser un routage optimal réside de l'une des caractéristiques de routage à plat ; celle que tous les nœuds peuvent communiquer entre eux sans avoir appel à un intermédiaire.

#### Inconvénients

- Points chauds (Hotspots) : si les nœuds capteurs sont uniformément distribués dans tout le réseau et il y a un seul nœud puits. Alors, les nœuds au tour de ce dernier épuiseront leurs énergies plus tôt que les autres nœuds Parce que tout le trafic du réseau passe par les nœuds entourant le nœud puits.



### 2.4.1.2 Routage hiérarchique

Les protocoles de routage hiérarchiques sont chargés généralement d'établir des cluster-heads et de définir la manière dont laquelle les nœuds décident quel cluster-head à rejoindre. Le but principal de routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster particulier et en performant l'agrégation de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. La formation des clusters est typiquement basée sur l'énergie réservée dans les nœuds capteurs et de la proximité de ceux-ci au cluster-heada[16].

- **LEACH** (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

Dans [30], Heinzelman et al. ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé LEACH pour le routage dans les réseaux de capteurs homogènes. LEACH choisit aléatoirement les nœuds cluster-heads et attribue ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin (c'est-à-dire tourniquet) pour garantir une dissipation équitable d'énergie entre les nœuds. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les nœuds membres qui appartiennent à leur propre cluster, et envoient un paquet agrégé à la station de base. LEACH est exécuté en deux phases : la phase " set-up " et la phase " steady-state " suivant la Figure 2.3. Dans la première phase, les cluster-heads sont sélectionnés et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base aura lieu. Durant la première phase du Protocole de routage hiérarchique, le processus d'élection des cluster-heads est déclenché pour choisir les futurs cluster-heads. Ainsi, une fraction prédéterminée de nœuds s'élisent comme cluster-heads selon le schéma d'exécution suivant : durant une période  $T$ , un nœud  $n$  choisit un nombre aléatoire  $nb$  dont la valeur est comprise entre 0 et 1 ( $0 < nb < 1$ ). Si  $nb$  est inférieure à une valeur seuil alors le nœud  $n$  deviendra cluster-head durant la période courante, sinon le nœud  $n$  devrait rejoindre le cluster head le plus proche dans son voisinage.

Cependant, bien que LEACH puisse augmenter la durée de vie du réseau, il présente certaines limitations. LEACH suppose que tous les nœuds puissent transmettre des données avec une grande puissance pour atteindre la station de base et que chaque nœud a une puissance de calcul lui permettant de supporter différentes couches MAC. Par conséquent, LEACH ne convient pas aux réseaux déployés dans de vastes régions. En outre, LEACH choisit aléatoirement la liste des cluster-heads et il ne pose aucune contrainte sur leur distribution ainsi que sur leur niveau d'énergie. Ainsi, les cluster-heads peuvent se concentrer dans un même endroit et par conséquent, il pourrait exister des nœuds isolés (sans cluster head) pouvant se déclarer. D'autre part, dans LEACH, l'agrégation des données est cen-

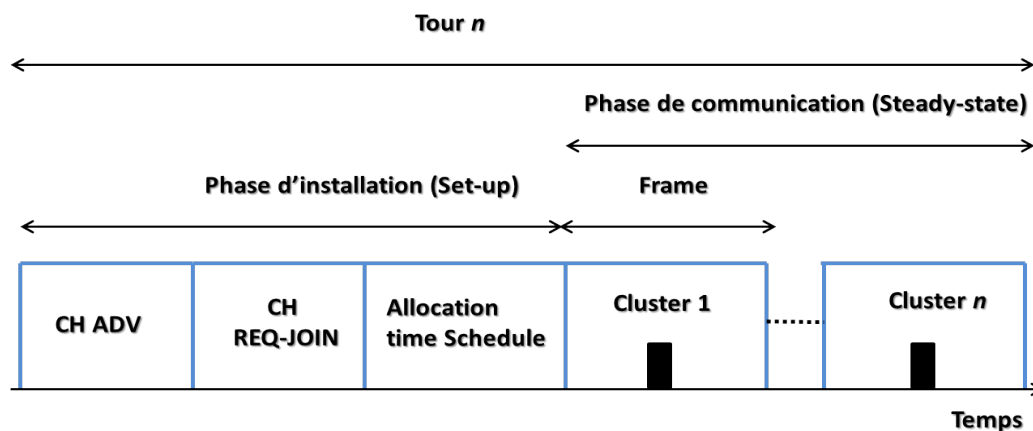


FIGURE 2.3 – Formation de clusters dans LEACH.

tralisée et est exécutée périodiquement. Or, dans certains cas, la transmission périodique des données pourrait ne pas être nécessaire, ce qui épuise rapidement l'énergie limitée des capteurs.

Une variante de LEACH appelée LEACH-C [29] a été conçue pour améliorer les performances de LEACH. Cette variante utilise une architecture centralisée pour choisir les cluster heads tout en impliquant la station de base et l'information de localisation des capteurs. Cependant, elle augmente considérablement le surcoût du réseau puisque tous les capteurs devront envoyer leurs informations de localisation à la station de base en même temps pendant chaque phase d'élection de cluster heads. Plusieurs travaux présentés [78] dans la littérature ont prouvé qu'une telle architecture centralisée ne supporte pas le passage à l'échelle, étant plus particulièrement appropriée à des réseaux de petite taille.

Dans [12], les auteurs ont proposé un protocole hiérarchique basé sur LEACH. Les cluster heads formés dans LEACH sont groupés et organisés en une hiérarchie. Ils ont montré que la consommation énergétique diminue lorsque le nombre de niveaux de la hiérarchie augmente.[14]

#### • PEGASIS et PEGASIS hiérarchique

Les auteurs [71] ont proposé une version améliorée de LEACH appelée PEGASIS. L'idée principale de PEGASIS est de former une chaîne entre les nœuds de sorte que chaque nœud reçoive de 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 dans le but de réduire l'énergie moyenne dépensée par un nœud durant une période (round). Contrairement à LEACH,

PEGASIS évite la formation des clusters et procure à un seul noeud dans la chaîne l'envoi de données à la station de base. D'ailleurs, PEGASIS suppose que les noeuds sont capables de modifier leur puissance de transmission.

Les résultats de simulation ont montré que PEGASIS peut prolonger de deux à trois fois la durée de vie d'un réseau de capteurs relativement à LEACH en fonction du critère choisi pour évaluer la durée de vie d'un réseau i.e. quand 1\$, 20\$, 50\$ ou 100\$ des noeuds épuisent leurs batteries. Un tel gain de performance est réalisé par l'élimination du surcoût causé par le processus de formation de clusters dans LEACH, et par la réduction du nombre de transmissions et de réceptions en agrégeant de données. Bien que le surcoût du clustering soit évité, PEGASIS exige toujours un ajustement dynamique de la topologie puisqu'un noeud devrait connaître le niveau d'énergie de ses voisins avant de relayer ses données. Cependant, un tel ajustement de la topologie pourrait causer un surcoût important en particulier dans les réseaux les plus utilisés. En outre, PEGASIS suppose que tout noeud communique directement avec la station de base qui gère la topologie d'une manière centralisée. Or, cette supposition est loin de la réalité car les capteurs communiquent généralement en mode multi-sauts pour atteindre la station de base. D'autre part, PEGASIS suppose que tous les noeuds maintiennent une table contenant les localisations de tous les autres noeuds dans le réseau. En résumé, PEGASIS est adapté seulement aux capteurs sans fil dont les noeuds sont immobiles. Son évaluation dans des environnements mobiles pourrait dégrader considérablement ses performances.

Une variante de PEGASIS appelée Hierarchical PEGASIS [48] a été conçue afin d'améliorer PEGASIS. Dans Hierarchical PEGASIS, la chaîne est divisée en groupes de la sorte que chaque noeud communique avec un seul noeud voisin de niveau plus bas de la hiérarchie. Les transmissions simultanées en parallèle dans des groupes différents minimisent le délai de transmission. Un autre protocole similaire à PEGASIS, appelé C2E2S, a été proposé dans [34]. Il est basé sur les clusters et les chaînes. C'est un protocole centralisé où la station de base organise le réseau en se basant sur l'information de l'énergie des noeuds.[14]

### **Avantages**

- L'agrégation de données : l'avantage du routage hiérarchique est que les données du cluster entier peuvent être combinées par le cluster-head et envoyées vers la destination.

### **Inconvénients**

- Points chauds (Hots pots) : les noeuds élus comme des cluster-heads consomment plus d'énergie que les autres noeuds dans le réseau. Si les cluster-heads ne changent pas

régulièrement, le réseau va être partitionné, c'est à dire le découpage du réseau en secteurs.

- Condition physique : plusieurs protocoles exigent que les nœuds cluster-heads ont des ressources énergétiques plus élevées que les autres nœuds dans le réseau.
- Complexité : si les nœuds cluster-heads ont la même capacité que les autres nœuds dans le réseau, donc, la méthode utilisée pour faire le routage et le choix des cluster-heads doit prendre en considération la contrainte de consommation d'énergie d'une manière équitable. Cela va augmenter le nombre des messages consommant l'énergie dans le réseau.
- Non scalable : les protocoles hiérarchiques ne sont pas scalables puisque le nombre des cluster-heads augmente quand la taille du réseau augmente. Et par conséquent, le nombre des messages overhead augmente lors de l'établissement de ces clusterheads.

### 2.4.1.3 Routage basé sur la localisation géographique

La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En général, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisque il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en termes d'énergie. Par exemple, si la région à servir est connue en utilisant la localisation des nœuds capteurs pour diffuser la requête seulement à cette région particulière, alors il est facile d'éliminer le nombre de transmission de manière significative [89].

- **MFR (*Most Forward within Radius*)**

Dans [27], les auteurs ont proposé le premier protocole de routage basé sur la localisation, appelé MFR (Most Forward within Radius). Dans MFR, chaque nœud recevant un message le transmet à l'un de ses voisins, sélectionné en fonction de sa position (figure 2.4). Le voisin dont la projection orthogonale est la plus proche de la station de base est choisi. Le processus continue tant que le paquet n'a pas atteint sa destination finale (station de base).

Dans la figure 2.4, le nœud G est le plus proche de la station de base, mais le nœud source (S) envoie son paquet au nœud M, car ce dernier a une projection (m) sur l'axe SD plus proche de la destination (D).

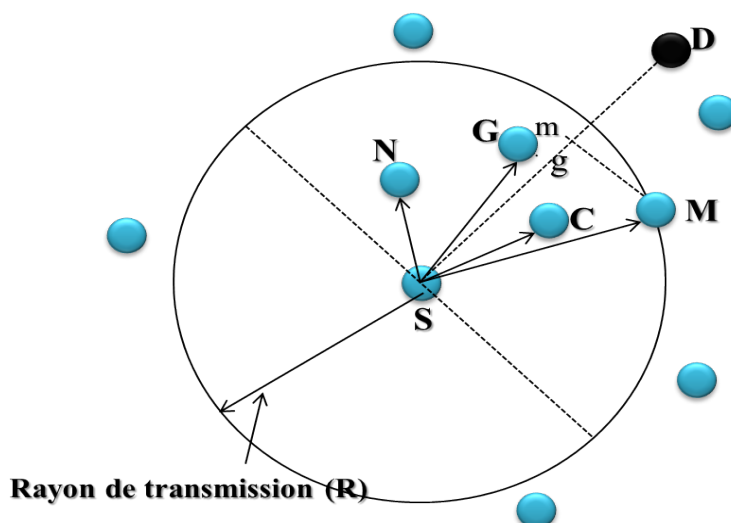


FIGURE 2.4 – Fonctionnement de MFR.

- **GAF** (*Geographic Adaptive Fidelity*)

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) [80] est un protocole de routage basé sur la localisation, efficace en consommation d'énergie. Ce protocole initialement conçu pour les réseaux Ad hoc, peut être aussi bien appliqué aux réseaux de capteurs. GAF conserve l'énergie par la déconnexion des nœuds inutiles dans le réseau sans affecter le niveau de fidélité de l'opération de routage. Le niveau de fidélité est défini par une connectivité sans interruptions entre les nœuds communicants. Pour cela, le protocole forme une grille virtuelle à travers la zone de capture, ou chaque nœud utilise le service GPS pour pouvoir se positionner, et s'associer à un point particulier de la grille construite. Les nœuds se trouvant dans la même zone de la grille sont considérés équivalents en termes de coût lié au routage des paquets (figure 2.5). L'intérêt d'une telle équivalence est de n'utiliser à la fois qu'un seul nœud et de mettre en veille les nœuds associés au même point de la grille afin d'optimiser l'énergie consommée. Ainsi, GAF peut sensiblement augmenter la durée de vie du réseau au fur et à mesure que le nombre de nœuds augmente.



routing), routage basé sur le flux de données dans le réseau (Network flow based routing), routage basé sur des multi-chemins (Multi-path based routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing).

#### 2.4.2.1 Routage basé sur la QdS

Dans les protocoles de routage basés sur la QdS, le réseau doit faire un compromis entre la consommation de l'énergie et la qualité des données. En particulier, le réseau doit satisfaire une certaine métrique de QdS, par exemple : largeur de la bande passante [52].

- **SAR** (*Sensor Aggregates Routing*)

Le protocole SAR (Sequential Assignment Routing) [73] est l'un des premiers protocoles de routage dans les RCSF qui présente la notion de QdS dans sa décision du routage. La décision de routage en SAR dépend des trois facteurs : ressource énergétique, qualité de service de chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet transmis. Pour éviter la panne d'un simple itinéraire, une approche par trajet multiple est employée et des schémas de restauration de chemins sont utilisés.

En effet, pour créer des chemins multiples à partir de chaque nœud jusqu'à la station de base, plusieurs arbres d'une longueur d'un saut de ce nœud sont initialement construits. Chaque arbre est par la suite développé en allant successivement de la station de base vers les autres nœuds, tout en évitant ceux qui ont des faibles valeurs de QdS (faible débit, grand délai de transmission). À la fin du processus, chaque nœud fera partie des chemins multiples et le capteur pourra connaître le nœud voisin pouvant être utilisé pour transmettre le message vers la station de base.

Le protocole SAR associe deux paramètres à chaque chemin au niveau d'un nœud donné, à savoir une métrique QdS additive et une valeur qui mesure la ressource énergétique résiduelle de chaque nœud. Une métrique de QdS additive à grande valeur correspond à une faible valeur de QdS. D'autre part, la ressource énergétique résiduelle d'un nœud est calculée via l'estimation du nombre de paquets pouvant être routés suivant un chemin donné, sans épuisement de l'énergie résiduelle des nœuds. SAR calcule, par la suite, une métrique pondérée de QdS égale au produit de la métrique QdS additive par un coefficient lié au niveau de priorité du paquet transmis.

Le protocole SAR essaye donc de minimiser la valeur moyenne de la métrique de QdS pondérée tout au long de la durée de vie du réseau. Périodiquement un processus de calcul des chemins est relancé par la station de base afin de prendre en compte tout changement dans la topologie du réseau. La prise en charge des chemins défectueux se fait entre les nœuds voisins en utilisant des procédures de recouvrement locales.

## • SPEED

Dans [28], les auteurs ont proposé un protocole de routage pour les réseaux de capteurs avec qualité de service nommé SPEED. En effet, pour assurer un acheminement des données en temps réel, avec des délais de bout en bout acceptables, le protocole maintient les informations de voisinage au niveau de chaque noeud, il utilise également la technique de renvoi géographique (geographic forwarding) pour la construction des routes employées. De plus, SPEED essaye de garantir une certaine vitesse de transmission pour chaque paquet dans le réseau. Ainsi, chaque application peut estimer, avant l'utilisation du protocole, les délais de bout en bout offerts, en divisant la distance qui sépare les capteurs sources des stations de base par la vitesse des paquets. SPEED englobe également des techniques qui permettent d'éviter la congestion dans le réseau de capteurs.

### Avantages

- La prise en compte des délais de transmissions rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications de surveillance (centres nucléaires, monitoring médical, applications militaires, etc.).
- La qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions.
- Augmentation du taux d'arrivée des paquets au noeud puits.
- Répartition du trafic, d'une part, en équilibrant la charge en énergie, et d'autre part, en évitant les liens défaillants.

### Inconvénients

- L'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.
- Pas de prise en compte de la sécurité qui est l'un des critères de la QoS.
- Le temps mis pour la découverte de chemin augmente le délai de bout en bout, chose non toléré surtout pour les trafics très urgents.

#### 2.4.2.2 Routage basé sur le flux de données dans le réseau

Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents noeuds [16, 75].



**2.4.2.2.1 L'algorithme max-min zPmin** Dans [62], les auteurs développent un algorithme de routage on-line (sans connaissance a priori sur le flux des données), sensible à l'énergie, en se basant sur les flux de données du réseau. L'algorithme max-min zPmin vise à combiner deux objectifs : Le premier consiste à calculer le chemin qui consomme une énergie minimale Pmin. Le deuxième, consiste quant à lui à trouver le chemin qui maximise le minimum d'énergie résiduelle dans le réseau. Une restriction de l'énergie de communication des messages est mise en œuvre par l'application d'un seuil de consommation énergétique. En effet, un message m transmis ne doit pas consommer plus de la valeur zPmin, telle que  $z > 1$ , où z représente le paramètre de restriction de la puissance de transmission du message.  $\mu_{tij}$  est calculée comme suit :

$$\mu_{tij} = \frac{(E_t - e_{ij})}{E} \quad (2.1)$$

**Formulation de l'algorithme :**

1. Trouver le chemin consommant une puissance minimale Pmin, par l'application de l'algorithme de Dijkstra.
2. Trouver le chemin le moins coûteux en énergie dans le graphe. Si (puissance consommée  $> z.Pmin$ ) ou (aucun chemin trouvé) alors Le chemin précédent représente la solution, Arrêt.
3. Calculer l'énergie résiduelle minimale  $\mu_{tij}$  dans un chemin, Cette énergie est appelée  $\mu_{min}$ .
4. Trouver tous les liens qui ont une énergie résiduelle  $\mu_{tij} \leq \mu_{min}$ , et supprimer ces derniers du graphe.
5. Aller à 2.

$E_t$  : l'énergie de la batterie à l'instant t.

$e_{ij}$  : l'énergie de communication entre i et j.

**E** : le niveau d'énergie initial de la batterie. Si  $z=1$ , l'algorithme calcul les chemins qui consomment moins d'énergie. Alors que si  $z=1$  (valeur très élevée de z), l'algorithme calcul les chemins incluant des nœuds ayant une grande quantité d'énergie. Pour cela, la valeur z change à chaque période de temps T, selon l'énergie des nœuds [89].

**Avantages**

- L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.
- La durée de vie du réseau est présentée comme une fonction générale de tous les nœuds, dont l'objectif est de maximiser les durées de vie élémentaires des capteurs

ainsi que la capacité du réseau.

- Répartition du trafic de façon à assurer l'équité en consommation d'énergie entre les nœuds.

### **Inconvénients**

- Des informations sur la topologie du réseau sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grande échelle.
- Cette approche est valable pour les RCSFs avec des topologies spécifiques (par exemple : un seul nœud origine).
- Cette technique est adoptée à des réseaux dont la topologie contient un seul nœud d'origine.

#### **2.4.2.3 Routage basé sur multi-chemins**

Dans cette sous-section, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire soit défaillant. Ceci peut être augmenté en maintenant les chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation d'énergie et d'une génération du trafic. Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents [37, 2].

#### **• Diffusion dirigé (DD)**

Dans [37], les auteurs ont proposé un paradigme d'agrégation de données populaire pour les RCSF, appelé DD (Directed Diffusion). La diffusion dirigée est un protocole centré données qui suppose que les informations générées par les capteurs sont décrites par des paires (attribut - valeur), ces attributs servent, par exemple, à décrire le type du phénomène capté, sa position géographique, sa durée, etc. La station de base réclame les données requises par l'envoi de son intérêt sous forme de requête vers les nœuds du réseau. L'intérêt est diffusé dans le réseau saut par saut et est émis par chaque nœud à ses voisins. Le format de l'intérêt est basé également sur le schéma de paires (attribut-valeur) pour désigner par exemple le type de données requises et le taux de leur transmission vers la station de base (nombre d'évènements envoyés par unité de temps). Durant le processus de dissémination d'intérêt, chaque nœud intermédiaire recevant l'intérêt, maintient à son niveau un cache d'intérêts, ou chaque entrée de ce cache possède plusieurs champs, notamment un champ d'estampille qui précise l'instant de dernière réception de l'intérêt, en plus d'un certain nombre de gradients (pouvant aller jusqu'à un gradient par voisin). Un gradient est un lien de réponse vers un

voisin à partir duquel l'intérêt a été reçu. Il est caractérisé par le débit, la durée et le temps d'expiration fournis par l'intérêt. Ces gradients sont établis afin de tracer les routes pouvant être employées ultérieurement, pour la collecte des événements captés. L'une de ces routes est par la suite renforcée pour être utilisée.

Afin de réduire les coûts de communication, les données sont agrégées sur leur chemin. Le but est de trouver un arbre d'agrégation qui permet l'acheminement des données des nœuds sources jusqu'à la station de base. La station de base régénère et renvoie périodiquement l'intérêt quand elle commence à recevoir des données à partir de la source (s). Ceci est nécessaire afin de vérifier que les requêtes sont diffusées dans tout le réseau. Les étapes de dissémination d'intérêt, construction de gradients et livraison de données de la diffusion dirigée sont montrées dans la figure 2.6.

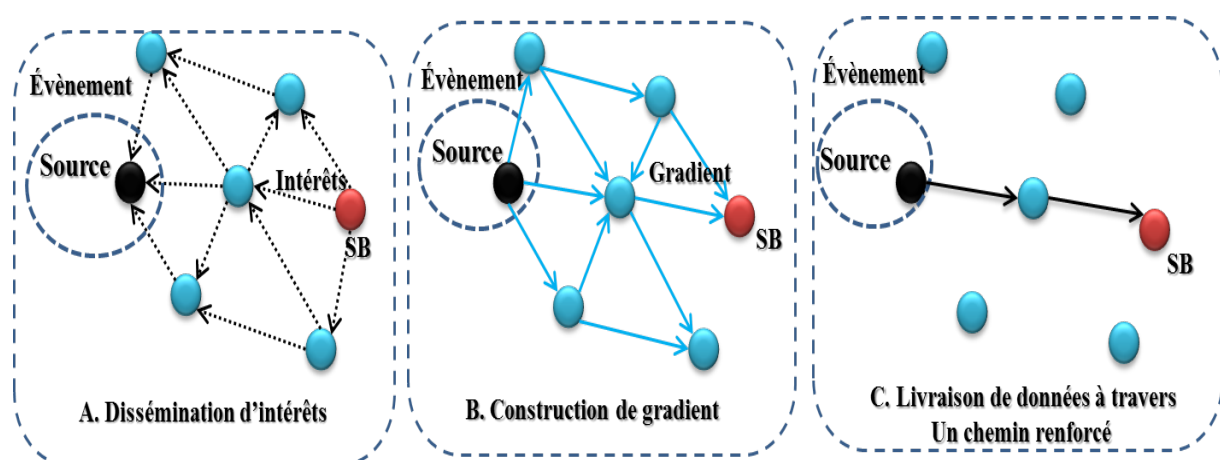


FIGURE 2.6 – Dissémination d'intérêt, construction de gradients et livraison de données de la diffusion dirigée

- **EAR** (*Energy Aware Routing*)

Shah [69] a proposé d'utiliser un ensemble de routes pour augmenter la durée de vie du réseau. Ces chemins sont choisis au moyen d'une fonction de probabilité qui dépend de la consommation d'énergie de chaque chemin. La capacité de survie du réseau constitue la métrique principale adoptée dans cette approche.

En effet, les auteurs partent du constat que l'utilisation répétée des routes à consommation d'énergie optimale épuise rapidement l'énergie des nœuds faisant partie de ces routes. Pour cela, un des chemins sous-optimaux alternatifs est utilisé avec une certaine probabilité, de telle sorte que la durée de vie globale du réseau soit augmentée. EAR suppose également que les nœuds sont adressés via un adressage basé-classes qui inclut la position et le type de chaque nœud. EAR comporte trois phases principales : l'installation, la communication

des données et la phase de maintenance.

1. **Phase de mise en route** : une inondation localisée se produit pour trouver la route et créer une table de routage en effectuant cette phase. Chaque noeud assigne une probabilité ( $\pi$ ) à chacun de ses voisins dans la table de routage.
2. **Phase de communication de données** : chaque noeud expédie le paquet en choisissant aléatoirement un noeud de sa table de routage en utilisant les probabilités.
3. **Phase de maintenance de la route** : une inondation localisée est lancée périodiquement pour mettre à jour la table des routes actives.

L'approche décrite est semblable à la diffusion dirigée par rapport à la manière dont les routes potentielles des points d'émission de données au destinataire sont découvertes. Dans la diffusion dirigée, les données sont envoyées par des routes multiples, l'une d'entre elles étant renforcée pour envoyer les données à des débits plus élevés. D'autre part, avec EAR une route unique est choisie aléatoirement à partir des solutions multiples afin d'économiser de l'énergie. La comparaison de EAR avec la diffusion dirigée a démontré qu'il procure une amélioration globale de 21% d'énergie consommée et une augmentation de 44% de la durée de vie du réseau.

Cependant, une telle utilisation des routes gêne la capacité de récupération d'un noeud lors de l'échec d'une route par opposition à la diffusion dirigée. En outre, l'approche exige de recueillir l'information de localisation et d'installer un mécanisme d'adressage pour les noeuds, ce qui complique singulièrement la création d'itinéraire en comparaison avec la diffusion dirigée[16].

#### **Avantages**

- Un mécanisme d'équilibre de charge peut être utilisé pour la répartition du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des noeuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens.
- L'augmentation de la fiabilité et de la robustesse par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination.

#### **Inconvénients**

- Les chemins alternatifs sont maintenus en vie par l'envoi de messages périodiques. Par conséquent, un overhead et une perte additionnelle d'énergie viennent s'ajouter pour maintenir ces chemins alternatifs.
- Le risque de perte des paquets augmente dans le cas où ces derniers sont envoyés sur des chemins ayant des noeuds communs qui peuvent tomber en panne.

#### 2.4.2.4 Routage basé sur la négociation

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles[16].

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

Dans [32, 77], les auteurs ont proposé une famille de protocoles adaptatifs appelés SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation). Cette famille de protocoles adaptatifs a été proposée pour pallier au problème d'ignorance de ressources, posé dans le protocole Flooding, en utilisant la négociation et l'adaptation aux ressources disponibles.

Les protocoles SPIN utilisent 3 types de messages :

- ADV : quand un nœud a une donnée à envoyer, il avertit ses voisins en utilisant ce message.
- REQ : un nœud envoie ce message s'il désire recevoir une donnée.
- DATA : ce message contient la donnée avec une entête contenant la méta-donnée.

Avant d'envoyer un message DATA, le nœud capteur diffuse un message ADV qui contient le descripteur, c'est-à-dire la méta-donnée de la donnée DATA à envoyer, comme le montre l'étape 1 de la figure 2.7. Il est à noter qu'il n'existe pas de format standard pour les méta-données employées, ces dernières sont supposées spécifiques à chaque application.

Si le nœud voisin est intéressé par la donnée, il envoie un message de type REQ pour DATA, cette dernière est par la suite envoyée à ce nœud comme le montrent les étapes 2 et 3 de la figure 2.7. Le nœud capteur voisin répète ce processus comme illustré dans les étapes 4, 5 et 6 de la même figure. De cette manière, seuls les nœuds capteurs qui sont intéressés par la donnée du message transmis auront une copie.

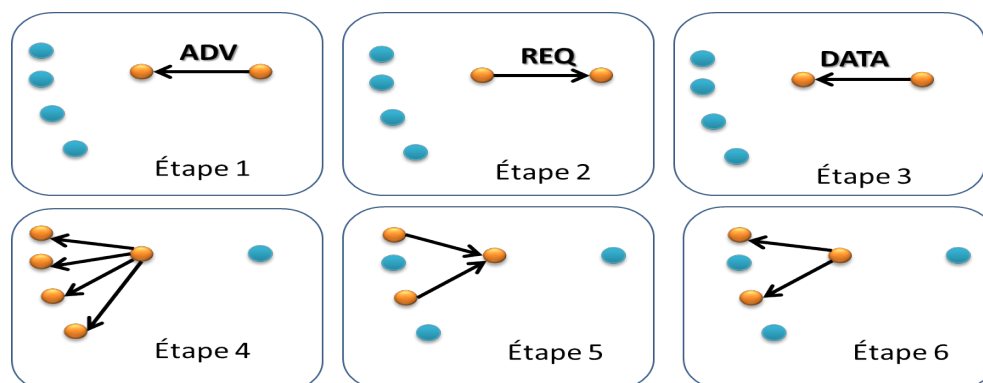


FIGURE 2.7 – Illustration des échanges de données dans SPIN.

### Avantages

- Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises.
- La négociation entre les nœuds permet à eux de prendre des décisions adéquates suivant leurs ressources énergétiques disponibles.
- L'agrégation utilisée dans les protocoles basés sur la négociation réduit la largeur de la bande passante.

### Inconvénients

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.
- Le scénario de négociation entre les nœuds (déterminer les données et les acheminer produit un retard pour délivrer les données au nœud puits.

## 2.4.3 Classification selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

### 2.4.3.1 Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles (qui peuvent représenter l'ensemble de tous les nœuds du réseau) au niveau de chaque nœud du réseau. [70].

#### • OLSR (Optimized Link State Routing)

Comme son nom l'indique, OLSR est un protocole proactif à état des liens optimisé ; il permet d'obtenir aussi des routes de plus court chemin. Alors que dans un protocole à état des liens, chaque nœud déclare ses liens directs avec ses voisins à tout le réseau, dans le cas d'OLSR, les nœuds ne déclarent qu'une sous-partie de leur voisinage grâce à la technique des relais multipoints (MultiPoint Relaying, MPR) [44] décrite par la suite.

Cette technique consiste essentiellement, pour un nœud donné, à ignorer un ensemble de liens et de voisins directs, qui sont redondants pour le calcul des routes de plus court chemin. Plus précisément, dans l'ensemble des voisins d'un nœud, seul un sous-ensemble de ses voisins est considéré comme pertinent. Il est choisi de façon à pouvoir atteindre tout le

voisinage à deux sauts (tous les voisins des voisins) ; cet ensemble est appelé l'ensemble des relais multipoints. L'algorithme de calcul de relais multipoints est donné dans [44].

Ces relais multipoints sont utilisés de deux façons : pour diminuer le trafic dû à la diffusion des messages de contrôle dans le réseau, et aussi pour diminuer la taille du sous-ensemble des liens diffusés à tout le réseau puisque les routes sont construites à base des relais multipoints [44].

L'idée de MPR est de minimiser l'inondation du trafic de contrôle dans un réseau en réduisant les retransmissions dupliquées dans la même région. Chaque noeud dans le réseau sélectionne un ensemble de noeuds de son voisinage auxquels ses messages seront transmis. Un noeud sélectionne ses MPRs parmi ses voisins à un saut avec un lien symétrique. Cet ensemble est choisi de manière à couvrir tous les noeuds qui sont à deux sauts. Les noeuds sélectionnés comme MPRs annoncent régulièrement leur condition de MPR dans les messages de contrôle envoyés à son voisinage. De cette façon, un noeud annonce au réseau qu'il est capable d'atteindre les noeuds qui l'ont élu comme MPR. Dans le calcul de la route, les MPRs sont utilisés pour la mise en place des routes vers toutes les destinations du réseau. Ainsi, en sélectionnant la route par l'intermédiaire des MPRs, on évite les problèmes liés à la transmission de paquets sur des liens unidirectionnels. Chaque noeud maintient l'information sur ses voisins qui ont été sélectionnés comme MPR. Un noeud obtient cette information par les messages de contrôle reçus périodiquement de ses voisins [63].

La Figure 2.8 montre la différence entre une diffusion pure et la diffusion en utilisant les MPRs. Par exemple, afin d'atteindre tous les noeuds à 3 sauts, la diffusion pure a besoin de 24 retransmissions du paquet envoyé par la source (voir la Figure 2.4, côté gauche). En utilisant les MPRs ou les relais multipoints (noeuds en gras dans le côté droit de la Figure 2.8), il suffit de retransmettre le paquet de la source 11 fois pour atteindre les noeuds à 3 sauts.

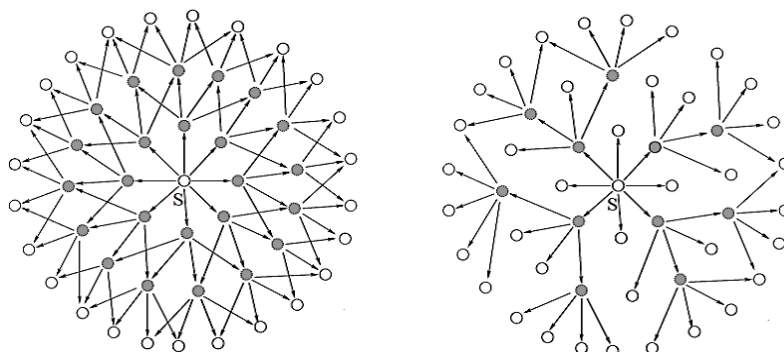


FIGURE 2.8 – Diffusion pure et diffusion en utilisant les MPRs dans OLSR.

OLSR est un protocole proactif et très bien adapté aux réseaux larges et denses. Tous les noeuds du réseau serviront de routeur et OLSR maintient sur chaque noeud une table de routage complète (comprenant une entrée pour tous les autres noeuds du réseau). Le protocole est complètement distribué, il n'y a pas d'entité centrale. Chaque noeud choisit la route la plus adaptée en fonction des informations qu'il a reçues.

Pour maintenir à jour toutes les informations nécessaires au choix des relais multipoints (MPRs) et au calcul de la table de routage, les noeuds OLSR ont besoin de s'échanger des informations périodiquement. Pour s'informer du proche voisinage, les noeuds OLSR envoient périodiquement des messages dits HELLO contenant la liste de leurs voisins. Ces messages permettent à chacun de choisir son ensemble de relais multipoints.

Le deuxième type de message d'OLSR est le message TC (Topology Control). Par ce message les sous-ensembles de voisinage que constituent les relais multipoints sont déclarés périodiquement dans le réseau. Ils sont diffusés en utilisant une diffusion optimisée par relais multipoints. Ces informations offrent une carte du réseau contenant tous les noeuds et un ensemble partiel de liens, mais suffisant pour la construction de la table de routage. La table de routage est calculée par chacun des noeuds et le routage des données s'effectue saut par saut sans l'intervention d'OLSR dont le rôle s'arrête à la mise à jour de la table de routage [44, 14].

#### **Avantages**

- Les routes sont établies à priori, ce qui facilite l'acheminement des données.
- Optimisé les délais de livraison.
- Adaptés aux réseaux denses de taille moyenne et dans les réseaux à forte mobilité.

#### **Inconvénients**

- Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées.
- Les noeuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes.
- La mise à jour de ces tables est assurée par la diffusion périodique des paquets de contrôle dans le réseau, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux à grande taille.
- Les messages de contrôles sont nombreux donc la bande passante disponible pour les données.

#### **2.4.3.2 Protocoles réactifs**

Les protocoles de routage réactifs (dit aussi, les protocoles de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route,



une procédure de découverte de route est lancée [16]. Les protocoles Diffusion direct (DD) et RR sont des exemples de routage réactif.

#### **Avantages**

- La conservation d'énergie par rapport aux protocoles proactifs.

#### **Inconvénients**

- Le routage à la demande induit une lenteur à cause de la recherche des chemins, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives.
- Il est impossible de connaître au préalable la qualité du chemin (en terme de bande passante, délais, etc).

### **2.4.3.3 Protocoles hybrides**

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

## **2.4.4 Classification selon l'initiateur de communication**

La communication dans un réseau de capteurs peut être lancée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

### **2.4.4.1 Communication lancée par la source**

Dans les protocoles de communication lancée par la source, les nœuds envoient des données à la destination quand ils les ont capturées. Ces protocoles utilisent les données rapportées avec time-driven ou avec event-driven. Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds capturent certains événements [16].

#### **Avantages**

- L'établissement de la communication dans le réseau évite le problème d'overhead.
- L'efficacité énergétique due à l'absence des requêtes qui consomment beaucoup d'énergie générées par le nœud puits.

### Inconvénients

- Les capteurs doivent avoir des informations sur les chemins qui conduisent au nœud puits.
- Pour cette approche, l'énergie n'est pas la seule préoccupation, des exigences de QoS doivent en général être respectées (latence, fiabilité).

#### 2.4.4.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles de communication lancée par la destination utilisent les données rapportées avec query-driven, et dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région [16].

### Avantages

- L'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puits élimine les transmissions inutiles.

### Inconvénients

- Les délais entraînés par l'établissement des routes.
- La circulation de messages requêtes de grande taille tend à épuiser les batteries des capteurs.

## 2.5 Les métriques de mesure de l'efficacité des protocoles de routage dans les RCSFs

Cette section présente les métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage. Les trois premières (le nombre de sauts "Hop-count", le temps de traverser un saut "Per hop round trip time" et la différence en temps d'arrivée de deux paquets par saut "Per hop packet pair delay") sont applicables à toutes les architectures des réseaux statiques sans fil, tandis que les cinq postérieures (la notion de coût "Cost awareness", la notion de puissance "Power awareness", la notion du coût-puissance "Power-Cost awareness", le temps du premier nœud à mourir "Time for first node to die" et le temps du dernier nœud à mourir "Time for last node to die") sont significatives seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie.[16, 64]

### 2.5.1 Le nombre de sauts

C'est la métrique la plus typique qui est utilisée dans la gestion des réseaux. Elle représente le nombre des nœuds traversés par une transmission pendant le transfert des données depuis la source à la destination. L'inconvénient principal de cette métrique est qu'elle ne mesure pas ou ne tient pas en compte la largeur de la bande passante disponible entre les nœuds. Elle ignore les longs chemins (qui ont un nombre élevé de sauts) malgré qu'il y a des chemins parmi eux qui peuvent avoir une bande passante plus large que la bande passante des courts chemins [64].

### 2.5.2 Le temps de traverser un saut

Cette métrique mesure le temps d'aller-retour des requêtes envoyées aux nœuds voisins. Cette métrique peut être calculée en ayant un nœud qui va envoyer un paquet de requête avec un estampille "timestamped" à l'un de ses voisins chaque 500 ms. Quand le voisin reçoit le paquet, il le transmet de nouveau à l'expéditeur. En comparant le timestamped avec la durée du retour, la qualité du lien peut être évaluée. Naturellement, les résultats de ce test peuvent être altérés par le temps d'attente "queuing delay" ou la charge sur les deux nœuds [64].

### 2.5.3 La différence en temps d'arrivée de deux paquets par saut

Cette métrique est une amélioration de la métrique précédente car elle réduit le temps d'attente qui peut modifier les résultats. Cette métrique peut être calculée, en ayant un nœud examinateur qui va envoyer à l'un de ses voisins deux requêtes toutes les deux secondes, tel que la première requête doit être envoyée avant la deuxième. Le récepteur calculera la différence de temps entre la réception des deux paquets et fera un rapport à l'expéditeur, ce dernier va maintenir ces différences de temps [64].

### 2.5.4 La notion du coût

"Cost awareness" représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie dans le routage dans laquelle nous essayons de prolonger au maximum la durée de vie d'un nœud. Les choix des opérations de routage que le nœud fera sont une fonction relative à son énergie de batterie restante. Afin d'utiliser "cost awareness" en tant qu'une métrique, on doit calculer la quantité d'énergie consommée pour chaque route imposée au réseau. Plus-la consommation d'énergie est minime plus les tâches de routage peuvent être accomplies par le réseau/nœud avant qu'il soit défaillant [74].

### 2.5.5 La notion de puissance

"Power Awareness" représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie. Elle essaye de réduire au minimum l'énergie totale qui a été dépensée lors de l'envoi d'un message depuis sa source à sa destination [74]. Afin d'utiliser "power awareness" en tant qu'une métrique, on doit attribuer un poids, basé sur la distance, sur chaque saut possible entre les nœuds du réseau.

### 2.5.6 La notion de coût-puissance

Cette métrique est la combinaison des deux métriques précédentes. Elle vise à réduire au minimum l'énergie consommée dans tout le réseau et en même temps elle évite qu'un nœud ait une quantité d'énergie limitée [74].

### 2.5.7 Le temps du premier nœud à mourir

Cette métrique détermine le temps auquel le premier nœud épuise complètement son énergie [82]. Elle n'est pas concernée par la défaillance d'un nœud dû à des raisons techniques.

### 2.5.8 Le temps du dernier nœud à mourir

C'est l'opposé exact de la métrique précédente, celle-ci enregistre le temps où le dernier nœud du réseau a consommé toute son énergie [82]. En d'autre terme, cette métrique mesure la durée de vie du réseau.

## 2.6 Tableau comparatif des protocoles de routage

Nous présentons ici la classification des protocoles de rouatge dans les RCSFs étudié dans ce chapitre.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l'art sur les principales approches proposées pour résoudre le problème de routage dans les RCSFs. Ces approches prennent en considération les limites imposées par l'architecture matérielle des capteurs ; en particulier l'énergie. Nous avons aussi effectué une classification et une étude critique des protocoles de routage proposés dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil.

Protocole/ Type	Centré données	Héirarchique	Localisation	QdS	Flux de données	Aggrégation des données
<b>Flooding</b>	Oui	-	-	-	-	-
<b>Gossiping</b>	Oui	-	-	-	-	-
<b>LEACH</b>	-	Oui	-	-	-	Oui
<b>PEGASIS</b>	-	Oui	-	-	-	Oui
<b>MFR</b>	-	Oui	Oui	-	-	-
<b>GAF</b>	-	Oui	Oui	-	-	-
<b>SAR</b>	-	-	-	Oui	-	-
<b>SPEED</b>	-	-	Oui	Oui	-	-
<b>DD</b>	Oui	-	-	-	-	Oui
<b>SPIN</b>	Oui	-	-	-	-	Oui
<b>EAR</b>	Oui	-	-	-	-	-
<b>OLSR</b>	Oui	-	-	-	-	-

TABLE 2.1 – Synthèse des protocoles

---

# ÉTAT DE L'ART SUR LES PROTOCOLES DE CLUSTERING DANS LES RCSFs

---

## 3.1 Introduction

Le routage hiérarchique est une stratégie qui vise à organiser le réseau d'une manière favorable à la réduction de la dissipation d'énergie afin de préserver cette ressource épuisable et difficilement rechargeable. Selon un processus de clustering, les nœuds du réseau sont groupés en clusters. Cela est établi par l'élection d'un chef pour le cluster, puis à déterminer les nœuds qui feront partie de ce dernier. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour le partitionnement du réseau en clusters. En effet, ces techniques permettent à classer les différents protocoles proposés selon cette approche de routage.

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art récent sur les protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs. Il fournit une classification suivant les différentes approches adoptées, puis nous présentant les challenges de conception d'un protocole de routage hiérarchique et nous terminons par une étude détaillée de quelques protocoles hiérarchiques.

## 3.2 Définitions

Dans des milieux hostiles et dangereux où l'intervention humaine est impraticable, il n'est pas toujours faisable d'organiser manuellement les nœuds en groupes. Pour cette raison, il y a eu une grande quantité de recherche sur des manières de créer des structures logiques d'organisation. Le clustering est considéré comme un point clé dans la conception

de ces réseaux.

Avec cette technique l'ensemble des capteurs est en général divisé en groupes (ou clusters), avec dans chaque groupe un leader (ou clusterhead). Ce dernier communique avec les membres du groupe et les clusterheads des autres groupes.

La tâche d'un clusterhead ne consiste pas seulement à router les données mais elle peut être complétée par une agrégation ou une fusion des données. De ce fait, des changements de rôle membre/clusterhead sont généralement appliqués pour répartir la charge de routage et d'agrégation des données entre les capteurs du réseau.

De ce fait, l'utilisation du mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs peut contribuer d'une façon considérable à l'économie d'énergie, la réduction de la complexité des protocoles de routage ainsi qu'à une meilleure résistance au facteur d'échelle (scalability). En effet, le routage hiérarchique facilite l'agrégation de données, ce qui conduit à diminuer les redondances et les transmissions inutiles vers la station de base. D'autre part, le clustering permet aux nœuds d'effectuer des transmissions sur des courtes distances avec leurs cluster-head, ce qui minimise la consommation d'énergie et optimise l'utilisation des ressources du médium de communication[20].

Nous présentons ci-dessous les principaux composants d'une architecture hiérarchique pour un réseau de capteurs :

- **Nœud capteur** : le nœud capteur est le composant noyau du réseau. De plus, ces capteurs peuvent jouer des rôles multiples, tel que la sensation simple, stockage, conduite de données et traitement. Cela dépend de leurs capacités en termes de calculs et puissance énergétique sans oublier l'influence du mécanisme d'affectation des rôles adapté par le protocole de clustering[55].
- **Cluster** : le cluster est un ensemble de nœuds qui forme l'unité d'organisation d'un réseau de capteurs. La nature dense de ses réseaux exige de le décomposer en cellules ou clusters afin de simplifier les tâches de communication et répondre aux différentes contraintes.
- **Clusters-heads** (CHs, leaders, chefs de groupes) : se sont les représentants des clusters. Ils sont souvent nécessaires pour l'organisation des activités dans les clusters. Leurs tâches ne se limitent pas à l'agrégation de données, elle s'étend aussi à l'organisation de la communication intra-cluster et même inter-cluster. Ces chefs peuvent être élus par

les autres nœuds ou bien sont prés-assignés pas le concepteur du réseau. Ils peuvent aussi être juste des nœuds ordinaires, ou bien des nœuds dotés de plus d'énergie[55].

- **Station de base** : la station de base se situe à un niveau supérieur de la hiérarchie d'un réseau de capteurs, elle permet de fournir une liaison entre le réseau et l'utilisateur final[55].

### 3.2.1 Avantages de routage hiérarchique

Les protocoles du routage hiérarchique sont chargés généralement d'établir des cluster-heads et de définir la manière dont laquelle les nœuds décident quel cluster-head à joindre. Les buts principaux de routage hiérarchique sont [1] :

- Faciliter le partage de ressource et/ou la synchronisation au sein d'un cluster.
- Optimiser l'utilisation de la bande passante en limitant les interactions inter-cluster et évitant les échanges superflus des messages avec station de base.
- Réduire la taille des tables de routage stocké au niveau des nœuds en localisant le chemin, car la mise en place des routes se fait seulement au niveau des clusters-heads.
- Agrégation de données transmises au collecteur. Les données qui sont collectées à partir d'un ensemble de nœuds d'un cluster peuvent être fusionnées par un cluster-head et par la suite envoyées vers le puits ce qui permet la réduction du nombre de paquet échangés.
- Stabiliser la topologie au niveau des nœuds et donc minimiser les frais de la maintenance de ce dernier. Un nœud ne s'inquiète que sur le choix de cluster-head auquel il va être relié. Par conséquent il n'est pas affecté par les changement au niveau de ces chefs.
- Implémenter des mécanismes des clusterisation afin d'augmenter la durée de vie de la batterie, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.



### 3.2.2 Contraintes et facteurs de conception d'un protocole de routage hiérarchique

Dans cette partie, nous présentons un certain nombre de considérations qui sont indispensables pour la conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. Comme les réseaux de capteurs imposent des fonctions spécifiques et des contraintes sur les ressources, leurs efficacité et survivabilité dépendent considérablement de la qualité de leurs protocoles. Afin de concevoir un protocole de routage efficace, les facteurs détaillés ci-dessous doivent être pris en compte.

- **Energie limitée** : Les nœuds capteurs ont un stockage d'énergie limité et l'utilisation efficace de cette dernière est un défi à relever. Cette contrainte énergétique doit être prise en compte dans le processus de clustering afin de réduire la dissipation d'énergie entre les nœuds du réseau. Par ailleurs, ce défi énergétique a un impact direct sur la durée de vie du réseau en entier. Pour cela, grouper les nœuds dans les clusters devrait organiser la topologie du réseau et contribuer à réduire la consommation d'énergie de ses nœuds afin d'augmenter sa durée de vie [1].
- **Formation de clusters** : L'efficacité d'un algorithme de clustering est évaluée en termes de nombre de clusters formés et de leurs stabilités en fonction de la mobilité des nœuds (la capacité de s'adopter au changement de la topologie du réseau). Il existe plusieurs méthodes de formation de clusters. Mais la plus répandue s'exécute sur trois [55].
  - **Election de cluster-head** : Appelée aussi la phase Set-up : chaque nœud prend la décision de devenir CH ou bien de se joindre à un CH selon sa connaissance locale de la topologie en utilisant une métrique spécifique ou une combinaison de métriques tels que le plus grand/petit ID dans son voisinage, le degré de connectivité, la puissance de transmission, l'énergie résiduelle. . . , ou bien selon un poids qui représente une combinaison de quelques métriques [55].
  - **Communication intra-cluster et inter-cluster** : Chaque cluster-head se charge des communications à l'intérieur de son cluster et maintient les informations de routage lui permettant de joindre la station de base. Pour atteindre la station de base, les clusters-heads communiquent directement à cette dernière sinon une communications multi-saut est adoptée en utilisant d'autres clusters-heads comme nœuds relais [56].
  - **Maintenance des clusters** : Dans le but de s'adapter aux changements de la topologie du réseau, une mise à jour des clusters est dynamiquement réalisée pour reconnaître les nouveaux nœuds ajouter ou ceux disparus (les nœuds qui ont consommés leurs énergies). D'autre part, si le cluster-head garde son statut le plus longtemps

possible, même s'il ne possède pas par exemple le poids maximum dans son propre cluster alors il perdra son rôle une fois sa batterie sera épuisée [56].

- **Qualité de service (Qos) et les opérations temps-réel** : Dans certaines applications, la donnée doit être délivrée rapidement après sa capture, sinon elle n'est plus utile et par conséquent, la latence définie pour la livraison des données est une autre condition pour les applications qui sont soumises sous des contraintes de temps. Cependant, dans plusieurs applications, la conservation d'énergie, qui est directement liée à la durée de vie du réseau est considérée relativement plus importante que la qualité des données envoyées. Pendant que l'énergie s'épuise, le réseau exige de réduire la qualité des résultats afin de réduire la diminution d'énergie dans les nœuds, et par conséquent augmenter la durée de vie du réseau[55].
- **Synchronisation** : L'une des principales limites des réseaux de capteurs sans fil est la limite d'énergie des nœuds, la transmission par tranche de temps en utilisant (TDMA) permet aux nœuds de programmer régulièrement des intervalles de sommeil afin de réduire au minimum la consommation d'énergie, de tels procédés exigent des mécanismes de synchronisation pour installer et maintenir le plan de transmission, ce qui aura des effets considérables sur la vie et l'ensemble des performances du réseau [56].
- **Agrégation de données** : Une des caractéristiques majeure des réseaux de capteurs est la densité des nœuds. Cependant, il y a souvent de multiples capteurs qui recueillent la même information dans le réseau. L'agrégation sert à combiner les données qui proviennent de plusieurs nœuds en une information significative ce qui éliminera la redondance. Entre autre, l'utilisation des techniques d'agrégation de données dans les protocoles de clustering réduit la quantité des données transmises, minimise considérablement la communication entre les nœuds, résous le problème d'implosion dans les tables de routage et allège en conséquence la congestion du réseau [55].
- **Mécanisme de réparation** : En raison de la nature des réseaux de capteurs sans fil, ils sont souvent sujets à la mobilité des nœuds, à la mort d'un nœud ou à des interférences, toutes ces situations peuvent entraîner des échecs de liens. Lorsqu'on examine les méthodes de création de cluster, il est important de se pencher sur les mécanismes à mettre en place pour le rétablissement de lien et assuré une communication fiable.
- **Capacités limitées** : La taille physique des capteurs et la petite quantité d'énergie stockée dans un nœud, limitent beaucoup la capacité de ces capteurs en termes de communication et puissance de traitement. Un bon protocole de clustering devrait se servir des ressources partagées entre les nœuds tout en considérant la limitation de leurs capacités [1].

### 3.3 Classification des techniques de clustérisations

Les techniques de clustering proposées dans la littérature pour les réseaux de capteurs sont généralement classées selon [3] :

- L'architecture du réseau et le modèle de fonctionnement.
- Les objectifs du processus de clustering.
- Taxonomie d'attributs de clustering y compris le nombre de clusters désirés et les propriétés générées de ces derniers.
- Les paramètres de prise de décision.

Cette classification de différentes méthodes de clustering utilisées dans la littérature va permettre de fournir une vue générale sur ce mécanisme, mais aussi et surtout sur les multiples choix possibles lors de la conception des clusters, les objectifs à atteindre, les propriétés des clusters et cluster-heads à satisfaire et les paramètres intervenants dans la prise de décisions lors de ce processus. Chaque critère va être étudié en détail avec une description de catégories associées et ses caractéristiques ainsi que son influence sur l'organisation du réseau en cluster.

#### 3.3.1 L'architecture du réseau et le modèle de fonctionnement

Différentes architectures et conceptions ont été considérées pour les applications des réseaux de capteurs. Dans la suite de ce paragraphe, les principaux paramètres architecturaux sont mis en évidence ainsi que leurs incidences sur le mécanisme de clustering [3].

**a. Mobilité du réseau :** La plupart des architectures de réseau suppose que les nœuds de capteur sont stationnaires mais parfois, il est nécessaire de tolérer la mobilité des nœuds. Sous telles conditions, le clustering devient une tâche très ardue. Les nœuds changent leurs positions et les clusters se voient obligés de s'adapter aux différentes configurations du réseau, en d'autres termes, l'événement surveillé peut être suivant l'application, périodique ou continue. Par exemple, il est périodique dans des applications de contrôle industriel et continue pour les réseaux surveillant des données environnementales, la soumission des rapports périodiques est exigée, ce qui génère un trafic important routé vers la station de base. Bien que les applications à suivi continu permettent d'avoir des groupes stables, elles peuvent augmenter considérablement la charge des CHs en fonction de nombre des nœuds présents dans les clusters [3].

- b. Traitement de données dans le réseau :** Dans un réseau de capteurs, plusieurs nœuds peuvent générer des données dupliquées. Cependant, les paquets semblables peuvent être agrégés de sorte que le nombre de transmissions soit réduit. L'agrégation combine les données de différentes sources en employant des fonctions telles que la suppression (élimination de redondances), minimum, maximum, et la moyenne. Généralement, toutes les fonctions d'agrégation sont assignées à des nœuds plus puissants ; il s'agit des nœuds élus comme cluster-heads (CHs). Par ailleurs, il est intéressant de choisir un autre nœud comme back up d'un CH, un nœud de remplacement en cas de panne, ou bien adapter un mécanisme de choix rotationnel et aléatoire pour le rôle de CH entre les différents nœuds du réseau afin de prolonger leur durée de vie et par conséquent celle du réseau [3].
- c. Le déploiement des nœuds :** Suivant le type d'application, le mode de déploiement des capteurs peut être déterministe ou aléatoire. Dans le déploiement déterministe 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-organisé, les nœuds sont dispersés aléatoirement, créant ainsi une infrastructure ad hoc [3].

### 3.3.2 Objectifs du processus de clustering

Le clustering est une méthode avec laquelle les nœuds sont hiérarchiquement organisés basée sur leur proximité relative l'un de l'autre selon certaines règles donnant une structure pour le développement d'importantes caractéristiques afin de répondre aux exigences d'applications.

- **Equilibrage de charge "Load balancing " :** La répartition équilibrée des capteurs sur les clusters est généralement un objectif pour les configurations où les CHs sont sélectionnés par ces capteurs, afin d'effectuer des fonctions de traitement de données et de gestion d'intra-clusters. Cependant, la mise en clusters à taille égale devient cruciale pour l'allongement de la durée de vie du réseau. Ceci empêche l'épuisement de l'énergie d'un sous-ensemble de CHs à taux élevés de nœud, ou de les rendre prématurément dysfonctionnelles. Il est impératif de disposer d'un nombre identique de nœuds dans les clusters quand les CHs effectuent l'agrégation de données de sorte que les rapports combinés deviennent prêts au même temps pour le traitement ultérieur à la station de base, ou au niveau supérieur dans la hiérarchie du réseau [3].

- **La tolérance aux fautes** : La petite quantité d'énergie dans les nœuds est parmi l'une des limitations primaires dans les réseaux de capteurs. Ces derniers sont souvent enclins à la mort et les interférences. Ces situations peuvent entraîner l'échec de liens de connectivité du réseau. Il est donc important de prévoir lors de la conception des protocoles de clustering des mécanismes de recouvrement après panne (algorithmes curatifs : qui utilisent une approche optimiste ne masquant pas les pannes, ou le mécanisme de tolérance aux pannes implémenté n'est exécuté qu'après la détection de pannes) ou bien implémenter des techniques tolérantes aux pannes, approche préventive, qui tente à retarder ou éviter tout type d'erreur afin de garder le réseau fonctionnel le plus longtemps possible tout en essayant de consommer le moins d'énergie et donc éviter par la suite une extinction prématurée de batterie, ce qui augmente la durée de vie des nœuds et assure une communication fiable même après la faille de certains de ces composants [3].
- **Minimisation de nombre de cluster** : Cet objet est particulièrement commun quand CHs sont des nœuds riches en ressources spécialisées. Le concepteur de réseau aime souvent employer le moindre nombre de ces nœuds puisqu'ils tendent à être plus chers et vulnérables que des capteurs. En outre, la taille de ces nœuds tend à être sensiblement plus grande que des capteurs, qui les rendent facilement discernables. La visibilité de nœud est fortement indésirable dans beaucoup d'applications de RCSFs telles que la protection de frontière, la reconnaissance militaire et la sécurité d'infrastructure[3].
- **Longévité maximale de réseau** :Puisque des nœuds de capteur sont contraignants en termes d'énergie donc la vie du réseau est un problème important. Cet objectif est particulièrement commun quand les CHs sont des nœuds riches en ressources spécialisées. Le concepteur du réseau préfère souvent employer le moindre nombre de ces nœuds puisqu'il tendent à être plus chers et vulnérable que des capteurs dans les environnements durs. Quand les CHs sont plus riches en ressources que des capteurs, il est impératif de réduire au minimum l'énergie pour la communication d'intra-clusters. Si c'est possible, CH devrait être placé près de la plupart des capteurs dans ces clusters. Le groupement adaptatifs est un choix perpétuel pour réaliser la longévité de réseau [3].

### 3.3.3 Taxonomie d'attributs de clustering

Un ensemble d'attributs (figure 3.1) est potentiellement identifiable pour classer par catégorie et différencier les protocoles de clustering dédiés aux réseaux de capteurs sans fil

[3].

La figure 3.1 montre la classification des différentes approches de routage dans les RCSFs selon les critères cités précédemment :

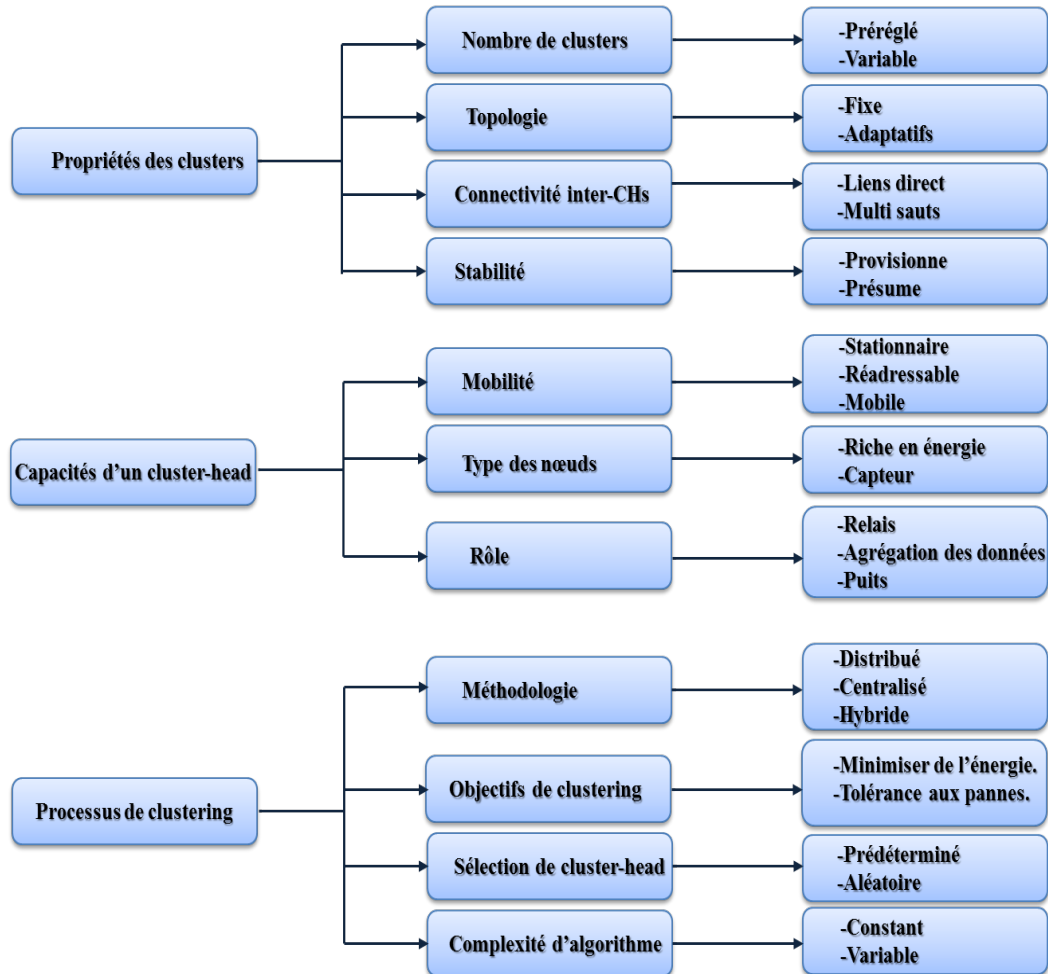


FIGURE 3.1 – Taxonomie d'attributs de clustering dans un RCSF

### 3.3.3.1 Propriétés des clusters

Souvent, le processus de clustering s'efforce à parvenir à un certain nombre de caractéristiques pour les clusters générés. Ces caractéristiques peuvent être liées à la structure interne du cluster ou à la façon dont il se rapporte avec d'autres clusters. Ci-dessous les attributs les plus pertinents [3] :

- **Nombre et taille de clusters :** Si l'ensemble des CHs est prédéterminée, le nombre de clusters dans le réseau sera prédéfini. Toutefois, la sélection aléatoire de CHs par les capteurs déployés résulte en un nombre variable de clusters. Dans certains cas, il est

souhaitable d'avoir un petit nombre de clusters afin d'acheminer les paquets rapidement entre ces clusters, mais dans d'autres cas (en présence de mobilité par exemple) il est important de garder une petite taille pour les clusters et par conséquent avoir un plus grand nombre de clusters pour pouvoir gérer les changements de la topologie.

- **Stabilité** : Si le nombre de clusters et l'appartenance d'un nœud à un cluster variaient tous le temps, le processus de clustering serait adaptatif. Autrement, il est considéré comme stable, fixe et les capteurs ne commutent pas entre les clusters. De même le nombre de ces clusters reste fixe tout au long de la durée de vie du réseau.
- **Topologie intra-clusters** : La communication entre un nœud et son CH dans un cluster est directe. Néanmoins, la connexion via multi-sauts entre les nœuds et leurs CH est parfois exigée, particulièrement quand la portée de la communication dans le cluster est limitée.
- **Connectivité inter-CHs** : Une grande partie des travaux publiés sur les réseaux de capteurs présume que le CH peut atteindre directement la station de base. D'autre part, si le CH n'a pas la capacité de communication à longues distances, la connexion des CHs à la station de base doit être assurée par l'établissement de routes inter-CHs jusqu'à la station de base.

### 3.3.3.2 Capacités d'un cluster-head

Le modèle du réseau influe sur le processus de clustering ; en particulier sur la capacité d'un nœud et sa portée de transmission. Les attributs de CHs suivants sont les facteurs de différenciation entre les schémas de clustering :

- **Mobilité** : Lorsque le CH est mobile, les nœuds membres sont modifiés dynamiquement et les clusters doivent être maintenus tout le temps. Autrement, les cluster-heads stationnaires tendent à avoir des groupes stables et à faciliter la gestion du réseau. Parfois, le CH peut se déplacer sur des distances limitées et à se repositionner afin d'avoir une meilleure performance pour le réseau.
- **Type des nœuds** : Dans certaines configurations, parmi les capteurs déployés, un sous ensemble est désigné comme CHs. Tandis que dans d'autres, les CHs sont des capteurs dotés de plus de ressources de calcul et de communication (capteurs dédiés).

- **Rôle** : Un CH peut simplement agir dans son cluster en tant que point de relais pour le trafic produit par les nœuds, ou exécuter l'agrégation/fusion des données rassemblées. Il peut également jouer le rôle d'un nœud puits et agir selon les phénomènes détectés.

### 3.3.3.3 Processus de clustering

Les caractéristiques du processus de clustering variaient de manière significative selon : la méthodologie adoptée, les objectifs à satisfaire, critères de sélection des CHs ainsi que la complexité de ses protocoles. Ces paramètres influent sur le classement des protocoles que nous présentons dans la section suivante.

- **Méthodologie** : Dans peu d'approches, une autorité centralisée, la station de base par exemple, affecte le rôle de chaque nœud et commande la formation de des clusters. Autrement, si les CHs sont juste des capteurs ordinaires, la construction des groupes doit être faite d'une façon autonome sans coordination. Or que dans le cas de cluster-heads riches en ressources, des techniques hybrides peuvent être utilisées. Cependant, la coordination inter-CHs est assurée d'une manière distribuée, alors que chaque CH se charge individuellement de la formation de son propre cluster. Une autre méthode est potentiellement employée pour avoir une architecture hiérarchique ; clusters des clusters [3].
- **Objectifs de clustering** : La formation des clusters et le choix des CHs dans un réseau de capteurs est influencé par plusieurs objectifs. En effet, un processus de clustering peut avoir de multiples objectifs. Par exemples la minimisation de la consommation d'énergie dans le réseau, la tolérance aux pannes, l'équilibrage de charge,... etc [3].
- **Choix de cluster-heads** : Un CH peut être pré-assigné ou bien sélectionner aléatoirement de l'ensemble des nœuds déployés. Généralement, les idées principales que l'on retrouve pour l'élection des CHs sont basées sur différentes métriques. L'énergie résiduelle au niveau d'un nœud, le voisinage peut aussi être envisagé comme critère de choix : le nœud ayant le plus grand nombre de voisins est désigné CH. La mobilité est pratiquement un autre paramètre de choix : le nœud est plus faible mobilité est élu tête de cluster. Le fait de prendre en compte la mobilité pour l'élection de CH assure une certaine stabilité lors du découpage du réseau. En effet, si on élit comme tête de cluster un nœud trop mobile, à chaque période, ses voisins auront changé et il devra



très souvent relancer la procédure d'élection. Par ailleurs, le poids attribué à chacun des nœuds utilisés pour l'élection de CHs [3].

- **Complexité du protocole :** Selon l'objectif et la méthodologie, de nombreux protocoles de clustering ont été proposés. La complexité et le temps de convergence de ces protocoles peuvent être constants, ou dépendant du nombre de CHs et/ou de capteurs. Alors, la complexité d'un protocole de clustering est essentielle pour l'estimation de la latence des messages échangés et les frais généraux de construction et d'entretien des clusters [3].

#### 3.3.3.4 Paramètres de décision

La décision de devenir nœud CH, ou pour joindre un cluster existant et construire des nouveaux clusters est généralement basée sur les paramètres suivants : le temps de convergence, le poids assigné à un nœud, l'émergence du processus de clustering et les heuristiques [53].

- **Décision basée sur le temps de convergence :** Si on considère que le point de départ d'un algorithme de clustering est l'état stable. Un seul événement, dans ce réseau (par exemple, un lien ou un capteur ajouté ou supprimé) va déclencher une série de mesures de restructuration de l'organisation du réseau. Le temps nécessaire pour que l'algorithme termine cet événement afin de réaliser une structure valide de clusters est noté la convergence du temps. Ce temps de convergence peut être constant : indépendant de la taille du réseau, ou variable selon la méthodologie suivi pour le choix de cluster-heads et/ou la formation de clusters.
- **Décision basée sur heuristiques :** Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement une solution réalisable, pas nécessairement optimale pour le problème d'optimisation NP-complet. Par exemple déterminer le nombre de clusters/cluster-heads dans le réseau. Une heuristique ou méthode approximative, est donc le contraire d'un algorithme exact qui trouve une solution optimale pour le problème donné. Il est généralement plus judicieux de faire à des méthodes heuristiques pour des problèmes difficiles ou l'usage de cette heuristique est pertinent pour calculer une solution approchée telle que le problème de clustering, et ainsi accélérer le processus de résolution.
- **Décision basée sur le poids :** Un poids est une fonction spécifique assigné à chaque nœud dans le réseau. Ce poids dépend de plusieurs métriques impliquées dans son

calcul comme l'énergie acquise par un nœud, le degré et la densité des nœuds, la distance aux voisins...etc.

- **Décision basée sur l'émergence** :L'émergence d'un algorithme se base sur un principe d'interactions subtiles entre éléments simples (nœuds) vers une organisation complexe (hiérarchie de clusters) possible qu'a grand échelle. Ce principe peut être approché analogiquement par la construction d'un avion ou tous les éléments : ouvrier, techniciens, interagissent pour la construction complexe de cet avion sans que chacun eu un plan.

### 3.4 Les protocoles de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil

Les approches de routage hiérarchique ont été proposées pour remédier aux problèmes du routage plat, en permettant plusieurs niveaux de communication, avec des rôles différents pour les nœuds capteurs. L'ensemble des capteurs est en général divisé en groupes (ou clusters), avec dans chaque groupe un leader (ou clusterhead). Ce dernier communique avec les membres du groupe et les clusterheads des autres groupes. La tâche d'un clusterhead ne consiste pas seulement à router les données mais elle peut être complétée par une agrégation ou une fusion des données. De ce fait, des changements de rôle membre/clusterhead sont généralement appliqués pour répartir la charge de routage et d'agrégation des données entre les capteurs du réseau.

#### 3.4.1 HEED (*A Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks*)

Les auteurs de [86] 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.

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

- Le fait, que le choix des CHs est une décision qui ne se base que sur des informations locales, des insuffisances dans la fonction du cout seront présentées telle le cas de la communication inter-clusters qui n'est pas prise en considération par cette fonction.
- L'étendue du réseau est posée comme un autre problème d'adéquation de ce protocole pour les réseaux à grande échelle, vu la stratégie adoptée pour la communication entre les CHs et la station de base qui se fait via un seul saut.
- Les clusters générés avec HEED ne sont pas tellement équilibrés en taille.

### 3.4.2 EECS (*Energy Efficient Clustering Scheme in WSN*)

Dans EECS [57], les auteurs ont proposé une nouvelle technique pour l'élection des CHs et la formation de clusters. Selon cette technique, les CHs candidats doivent router en concurrence pour devenir des CHs. Ces CHs candidats sont choisis parmi les nœuds du

réseau selon une probabilité prédéfinie.

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

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

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

- **Avantages**

- Ce protocole permet d'utiliser des tailles dynamiques pour les clusters. Il offre un faisabilité similaire à celle de LEACH en termes de mécanisme de recouvrement, avec une meilleure utilisation d'énergie dans le réseau et donc assurer une meilleure connexion.
- EECS présente de meilleures performances, en termes de conservation d'énergie et prolongation de la durée de vie du réseau.

- **Inconvénients**

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

### 3.4.3 TEEN (*Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*)

Les auteurs de [51] ont proposé une technique de clustering appelée TEEN pour les applications critiques où le changement de certains paramètres peut être brusque. L'architecture du réseau est basée sur un groupement hiérarchique à plusieurs niveaux où les nœuds les plus proches forment des clusters. Puis ce processus de clustering passe au deuxième niveau jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Après la formation des clusters, chaque

cluster-head transmet 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 de la valeur du paramètre contrôlé. L'occurrence de cette petite variation ST permet au nœud qui la détecte de la signaler à la station de base en transmettant un message d'alerte. Par conséquent, le seuil Soft réduira le nombre de transmissions puisqu'il ne permet pas la transmission s'il y a peu ou pas de variation de la valeur du paramètre contrôlé.

Au début, les nœuds écoutent le médium continuellement et lorsque la valeur captée du paramètre contrôlé dépasse le seuil Hard, le nœud transmet l'information. La valeur captée est stockée dans une variable interne appelée SV. Puis, les nœuds ne transmettront des données que si la valeur courante du paramètre contrôlé est supérieure au seuil hard HT ou diffère du SV d'une quantité égale ou plus grande que la valeur du seuil Soft ST[42].

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

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

Pour remédier aux limitations du protocole TEEN, les auteurs ont proposé une extension de TEEN appelée APTEEN [50]. APTEEN est un protocole hybride qui change la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans APTEEN, les cluster-heads 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 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. [42]

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

### 3.4.5 CSOS (*Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks*)

Les auteurs dans [47], [45], [46] ont proposé une technique d'auto-organisation basée sur l'approche de clustering pour optimiser la consommation de l'énergie dans ces réseaux. Cette technique consiste à regrouper les nœuds proches géographiquement en clusters. Elle implique des paramètres déterminants pour produire un nombre réduit de clusters homogènes en taille et en rayon, et que les clusters soient stables. Le poids de chaque capteur est calculé en fonction des paramètres suivants : la 2-densité, l'énergie restante, et la mobilité. Le capteur ayant le plus grand poids dans son voisinage à 2 sauts devient cluster head. En outre, la taille des clusters générés est comprise entre deux seuils ThreshLower et ThreshUpper, qui représentent respectivement le nombre minimal et maximal de capteurs dans un cluster. Ces deux seuils sont choisis arbitrairement ou dépendent de la topologie du réseau. Dans un cluster, chaque capteur membre est au plus à deux sauts de son cluster-head correspondant. Le processus d'élection des cluster heads est périodique après l'écoulement d'une certaine période  $t$  afin de distribuer équitablement la consommation de l'énergie parmi les capteurs durant la durée de vie du réseau.[42]

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

### 3.4.6 VGA (*Virtual Grid Architecture routing*)

Dans [7], [8], les auteurs ont proposé une approche de clustering pour maximiser la durée de vie dans les réseaux de capteurs dont les nœuds sont immobiles ou se déplacent avec une faible vitesse. Ils ont utilisé l'approche GPS-free [68] pour construire des clusters fixes, disjoints, et homogènes en taille avec des formes symétriques. Dans [7], [8], la zone de déploiement des réseaux de capteurs est divisée en une topologie virtuelle rectiligne contenant des petites zones ayant la forme d'un carré, et dans chacune, un nœud est choisi comme cluster head. L'agrégation de données est réalisée à deux niveaux : local et global.

L'agrégation locale est réalisée par l'ensemble des cluster heads appelés aussi Local Aggregators (LAs), alors que l'agrégation globale est réalisée par un sous ensemble de LAs appelés Master Aggregators (MAs). Cependant, la détermination de l'ensemble MAs est un problème NP-difficile. Les heuristiques qui ont été proposées pour former l'ensemble MAs à partir de l'ensemble LAs, avaient comme objectif la maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs. Par exemple, dans l'heuristique CBAH (*Cluster-Based Aggregation Heuristic*) proposée par les mêmes auteurs, l'ensemble MAs est choisi selon la capacité des éléments de LAs. Les membres d'un même cluster surveillent le même phénomène, et leurs lectures (détections) sont corrélées par leur LA correspondant. Ce dernier à son tour transmet ces données corrélées à son MA correspondant.[42]

- **Avantages**

- La zone de déploiement est divisée en petites zones ayant la forme d'un carré.
- L'agrégation de données est réalisée à deux niveaux, local et global.

- **Inconvénients**

- La difficulté de la détermination de l'ensemble MA.

### 3.4.7 EERFC (*Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster-Based Wireless Sensor Networks*)

EERFC [25] est un protocole de routage hiérarchique, il a été proposé pour améliorer le protocole FCA (algorithme de clustering fixe). FCA divise le réseau de capteurs en groupes fixes et place le cluster head au centre du groupe. L'emplacement de cluster au centre minimise la consommation d'énergie des nœuds capteurs les plus loin du cluster head, mais les clusters head perd beaucoup d'énergie lors de la transmission de données à la station de base.

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

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

### 3.4.8 EEPSC (*Energy Efficient Protocol Static Clustering*)

EEPSC [87] est un protocole de routage hiérarchique, il a été proposé pour améliorer le protocole LEACH, le protocole EEPSC se base sur le déploiement des nœuds ainsi la station de base se trouve sur l'une des extrémités du réseau.

EEPSC est un processus qui se déroule en trois phases :

**a. Phase d'installation :** La station de base envoie  $k-1$  messages périodiques avec différentes puissances d'émission, afin d'avoir  $k$  clusters. A chaque envoi de messages, les nœuds qui reçoivent ce message mettent le groupe le groupe à ID-K et informe la station de base par un message Join-Req et ID du K comme ID du groupe pour confirmer leurs appartenance au groupe.

Durant cette phase, le protocole CSMA est utilisé afin d'éviter les collisions. Les nœuds n'appartenant à aucun groupe sont considérer comme le dernier cluster.

La station de base sélectionne les CHt(Cluster head temporaire) aléatoirement et publie des règles de communication avec un calendrier TDMA, ce qui donne à chaque nœud un temps (time slot) pour transmettre.



**b. Phase de sélection du nœud responsable :** A chaque tour, chaque nœud envoie son niveau d'énergie au CHt dans son temps dédié (time slot), puis le CHt choisi le nœud ayant le maximum d'énergie pour l'élire CH (Cluster head), pour ce faire :

- Collecte de données des nœuds.
- Effectué une agrégation de données.
- Communiquer avec la station de base.

Pendant la sélection du CH, le nœud possédant l'énergie minimale dans le cluster, est désigné comme CHt du prochain tour. Le CH envoie un paquet déclencheur du cycle suivant (round-start) incluant l'ID du nœud responsable.

**c. Phase de communication :** La phase de communication est marquée par un envoi des nœuds ordinaires aux nœuds clusters head leurs données durant time slot pré-alloué. Ces données contiennent l'ID de nœud et les paramètres d'envoi, ainsi les CHs envoient directement les données à la station de base.

- **Avantages**

- EEPSC utilise un clustering statique, ce qui élimine la surcharge de clustering dynamique.
- EEPSC utilise les CHts pour répartir la charge de l'énergie parmi les nœuds de capteurs.
- Prolonge la durée de vie du réseau.

- **Inconvénients**

- Les CHs envoient directement leurs données à la station de base, ce qui peut épuiser un CH en une émission.
- Le critère de choix des CHs (énergie résiduelle), n'est pas toujours suffisant.
- Facteur du passage à l'échelle (scalabilité).

### 3.4.9 MHEED (*Multi-Hop Hybrid Energy Efficient Distributed clustering*)

MHEED [54] est un protocole de routage hiérarchique, il a été proposé pour améliorer le protocole HEED [86], le protocole MHEED se base la notion du multi saut pour résister au facteur d'échelle, et résoudre la lacune de communication à un saut qui existe dans le protocole HEED. Le protocole MHEED est un processus qui se déroule en 2 phases ;

1. **Phase d'agglomération** (*clustering*) : Faite selon le principe décrit dans HEED [86]. A la fin de cette phase, les chefs de grappes (cluster heads) sont élus et leurs grappes (clusters) sont formées.
2. **Phase de communication** : La transmission des données ce fait en deux étapes. Tout d'abord, les nœuds ordinaires transmettent de manière périodique leurs données à leurs chefs de grappe (pendant les tranches de temps qui leur sont allouées). A la réception de ces données, chaque chef va agréger les données de ces membres pour minimiser le nombre de paquets à transmettre. Il envoie le paquet agrégé à la station de base. Cette transmission est faite, de relais en relais, par le biais des chefs de relais prédéterminés comme suit :

Dans la première variante, appelée MHEEDB, chaque chef de grappe va garder un seul relais parmi les chefs de grappes voisines (le meilleur en terme de métrique utilisée). Dans la seconde variante, appelée MHEEDP, chaque chef de grappe va garder plusieurs grappes voisines. A chaque transmission de données, il choisit l'un d'entre eux (de manière probabilisée) pour faire suivre ses données ou celles reçues d'autres chefs plus éloignés l'ayant choisi pour relais.

A la fin de chaque tour d'agglomération (clustering), le processus d'agglomération est déclenché de nouveau. De nouveaux chefs de grappes sont élus. Et de nouveaux relais sont recherchés parmi ces derniers pour acheminer les données.

### **Avantages**

- MHEED résous le problème de scalabilité.
- MHEEDP permet de réaliser un équilibrage de charge entre les différents CHs.
- MHEED donne de meilleurs résultats en termes d'augmentation de la durée de vie du réseau.
- MHEED donne de meilleurs taux de délivrance des données.

### **Inconvénients**

- Les CHs à la proximité de la station de base meurent rapidement, ce qui cause la perte du réseau (problème des points chauds).

### 3.5 Tableau comparatif pour les protocoles de clustering

pour comparer et analyser les différentes philosophies des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs sans fil selon l'approche de clustering, il est important d'utiliser des critères de classification appropriés pour pouvoir les distinguer. En effet, la classification permet aux concepteurs de mieux comprendre les caractéristiques de ces protocoles et de discerner les relations qui le relient.

PROTOCOLES/CRITÈRES	Mobilité	Localisation	Couche MAC	Basé application	Agrégation des données	Qos	Scalabilité	multi chemins
<b>HEED</b>	SB fixée	Non	TDMA	Event-Driven	Centralisé	Non	Bonne	Non
<b>EECS</b>	SB Fixée	Oui	Non-précisé	Event-Driven	Non	Non	Limité	Non
<b>TEEN et APTEEN</b>	SB fixée	Non	TDMA	Event-Driven	Centralisé	Non	Limité	Non
<b>CSOS</b>	SB fixée	Oui	TDMA	Non précisé	centralisé	Non	Non	Oui
<b>VGA</b>	SB fixée	Oui	CDMA	Non précisé	Non	Non	Non	Oui
<b>EERFC</b>	SB fixée	Oui	TDMA	Event-Driven	Centralisé	Non	Limité	Non
<b>EEPSC</b>	SB fixée	Oui	TDMA	Event-Driven	Centralisé	Non	Bonne	non
<b>MHEED</b>	SB fixée	Non	Non-précisé	Event-Driven	Centralisé	Oui	Bonne	Oui

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

### 3.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de se familiariser avec les techniques de clustering ainsi que les différentes approches de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs.

L'étude de ces protocoles nous a permis de les comparer et de mettre en relief les avantages et les inconvénients des techniques de routage antérieurs adoptés par chacun d'eux. Malgré que certaines techniques paraissent prometteuses, il existe toujours certains côtés à améliorer, nécessitant leur prise en considération dans les travaux futurs.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la conception d'un nouveau protocole de routage hiérarchique à basse consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs et qui a pour ambition de maximiser la durée de vie du réseau.

---

# PROTOCOLE MUEEPSCZ (*Multi-Hop Unequal Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones*)

---

## 4.1 Introduction

La majorité des travaux de recherche menés actuellement dans le domaine des réseaux de capteurs se concentrent sur le problème de conservation d'énergie. Le développement d'une technique efficace permettant d'économiser la ressource énergétique est un objectif primordial pour les réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous proposons notre motivation ainsi que la présentation de la notion du multi-saut à travers une description détaillée des différentes phases qui le constitue. L'approche baptisée MUEEPSCZ (Multi-Hop Unequal Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones) s'appuie sur le principe des clusterheads, inspiré de l'algorithme EEPSC [88], par contre pour le regroupement des nœuds on garde le même principe utilisé dans EEPSC [88], on améliorant avec un partitionnement horizontal selon le critère de l'ongle.

## 4.2 Description du protocole

### 4.2.1 Motivation

Dans le but d'obtenir de meilleures performances dans les réseaux de capteurs en termes d'énergie consommée, il est primordial d'utiliser d'autres critères de choix concernant les clusterheads tel que l'énergie résiduelle, la distance par rapport à la station de base pour

une maximisation de la durée de vie des clusters head. L'objectif consiste essentiellement à optimiser la consommation de l'énergie et ce, afin d'éviter un écroulement du réseau de capteurs.

Les algorithmes de regroupement (clustering) pour un réseau de capteurs permettant la constitution des grappes (clusters) de capteur dont chacun est dominé par un cluster-head (CH). Ces CHs sont souvent nécessaires pour l'organisation des activités dans les clusters, leurs tâche ne se limite pas à l'agrégation de données, elle s'étend aussi à l'organisation de la communication intra-cluster et même inter-cluster (Figure 4.1). L'énergie consommée dans les échanges intra-cluster est proportionnelle au nombre de nœuds dans le cluster. Les algorithmes de clustering proposés tentent de former généralement des clusters de même taille, donc les clusterheads ont tendance à consommer la même quantité d'énergie pendant la phase intra-cluster de transfert de données.

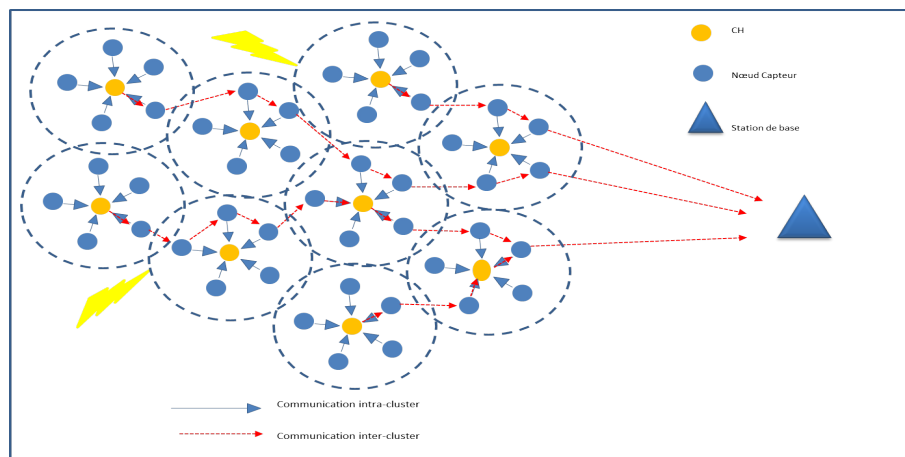


FIGURE 4.1 – Les différents communications.

Par contre durant la phase de communication inter-cluster, les nœuds proches de la station de base consomment beaucoup plus d'énergie à cause de la charge de trafic de relais. En effet, les nœuds communiquent leurs données à la station de base avec un routage multi-sauts. Le modèle de trafic résultant est non-uniforme et surcharge les nœuds proches de la station de base : la charge des nœuds près de la station de base est plus élevée par rapport aux autres nœuds comme illustré dans la figure 4.1.

Ainsi les clusterheads proches de la station de base consomment plus d'énergie et meurent plus vite que les autres clusterheads : problème des points chauds. Ce qui pourrait réduire la couverture de détection et conduire à la perte du réseau.

### 4.2.2 Hypothèses

Pour appliquer les propositions rédigé dans notre protocole nous allons nous basé sur le modèle du réseau suivant :

- Les nœuds capteurs sont tous identique (même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement de données).
- Les nœuds sont distribués sur la zone de capture aléatoirement et sont fixe.
- La station de base est vu comme une ressource non limité ni épuisable.
- La station de base n'est pas au centre de la zone de capture.
- La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie.
- Chaque nœud possède un identifiant unique.
- La station de base est capable d'envoyer des signaux unidirectionnels avec un angle  $\alpha$ .
- Les nœuds peuvent gérées leurs puissance d'émission.

### 4.2.3 Principe

Lors de l'étude du problème de routage, toutes ces contraintes sont à considérer le problème devient plus complexe lorsque le nombre de nœuds déployés augmente. Il s'agit du problème de résistance au facteur d'échelle (scalability).

Dans le protocole [88], les auteurs se sont penchés sur un balayage du réseau pour construire des clusters, le même principe est utilisé dans notre proposition. Par contre nous ajoutons au balayage cité précédemment, un balayage horizontal avec un angle  $\alpha$  ( $45^\circ$  pour notre cas) afin de créer des clusters de taille différente.

EEPSC utilise un routage à un saut ce qui n'est pas optimal (facteur de scalabilité), pour ce fait nous utilisant le principe du multi saut pour acheminer les données des capteurs vers la station de base inspirer du protocole MHEED [54] étudié dans le chapitre précédent.

Notre proposition se caractérise avec une stratégie d'acheminement multi saut ou les nœuds envoient les paquets vers la station de base en utilisant leurs voisins pour acheminer le paquet d'un niveau à un niveau plus bas jusqu'à atteindre la station de base. Pour ce fait nous avons adopté le principe de la recherche de relais [54], ce dernier prend en considération l'énergie résiduelle et la distance par rapport au nœud émetteur lors du choix du nœud relais.

Le fonctionnement de notre protocole est établi en trois phases, la phase d'installation (configuration) ou tous les clusters sont formés puis la phase de sélection des CHs ou les CHs sont désigné par les métriques ; énergie résiduelle et la distance de la station de base. Finalement la phase de routage des données vers la station de base. Les différentes phases de l'algorithme de clustering proposées sont détaillées dans ce qui suit :

#### 4.2.3.1 Phase d'installation (Configuration)

Cette phase est exécutée une seule fois durant tout le processus de routage, afin de réaliser un regroupement (*Clustering*) des nœuds de capteurs. L'installation permet de structurer le réseau en clusters statique (fixe) d'où nous évitons la surconsommation (*overhead*) lors du clustering dynamique.

L'installation du réseau se réalise en deux étapes, la première est caractérisée par la formation des niveaux (ou couches) du réseau, la seconde est réalisée par une division en zones avec un angle de diffusion  $\alpha$  (fixé à  $45^\circ$ ).

À la fin de cette phase notre réseau sera divisé en clusters statiques.

- **Formation des niveaux**

La station de base utilise un mécanisme pour partitionner le réseau en niveaux, pour ce fait la SB envoie  $(k-1)$  messages Hello différents et avec différentes puissances de signal, où  $k$  désigne le nombre de couche dans le réseau (désigné préalablement).

La puissance du signal est variée pour avoir des distances différentes à la SB, ce qui représente les niveaux suivant la formule suivante :

$$D = k * R_i \tag{4.1}$$

Où :

$R_i$  est la portée d'un nœud capteur qui est supposé pareil pour tous les nœuds de capteurs du réseau.

À la réception du message par les nœuds à portée, ils calculent la distance de la station de base avec l'affaiblissement du signal et mettent à jour leurs champs ID\_niveau à  $k$ .

Les nœuds qui n'appartiennent à aucun niveau sont considérés comme membres du cluster  $k$ , les nœuds se voient affecter  $k$  comme ID\_niveau. La figure 4.2 représente les niveaux formés dans cette phase.

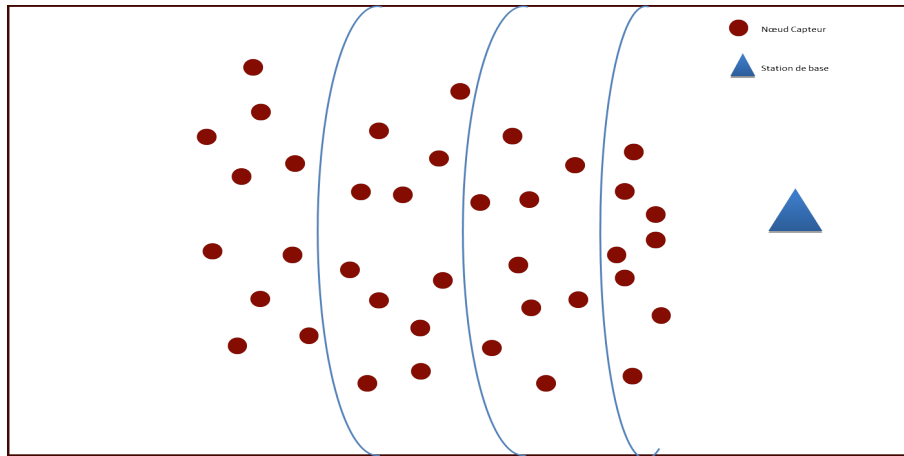


FIGURE 4.2 – Formation des niveaux.

À la fin de cette phase le réseau est repartitionner en niveaux, ou chaque nœud possède un ID\_niveau.

- **Formation des zones**

Une technique de découpage en zones est utilisée dans cette étape, une variable ID\_zone est assigné à chaque nœud capteur pour désigner sa zone ainsi les clusters du réseau sont formé.

La SB effectue un balayage horizontal avec un angle  $\alpha$  (fixé à  $45^\circ$ ) sur tous les niveaux du réseau, soit quatre (04) niveaux sur  $180^\circ$  (la SB ne se trouve pas au milieu du réseau). La SB inclue dans ce paquet un identifiant pour chaque zone sur tous les niveaux du réseau.

À la réception du message diffusé par un nœud d'une couche il met à jour le champ ID\_zone, les clusters sont formés d'une façon à ce que chaque cluster est composé des nœuds avec un même ID\_niveau et ID\_zone.

Après la détermination des clusters (niveaux, zones) la SB effectue une sélection aléatoire dans chaque cluster d'un CH\_T (Cluster Head Temporaire) qui aura pour mission d'élire le CH principal durant la prochaine phase (Phase de sélection des CHs), comme le montre la figure 4.3.



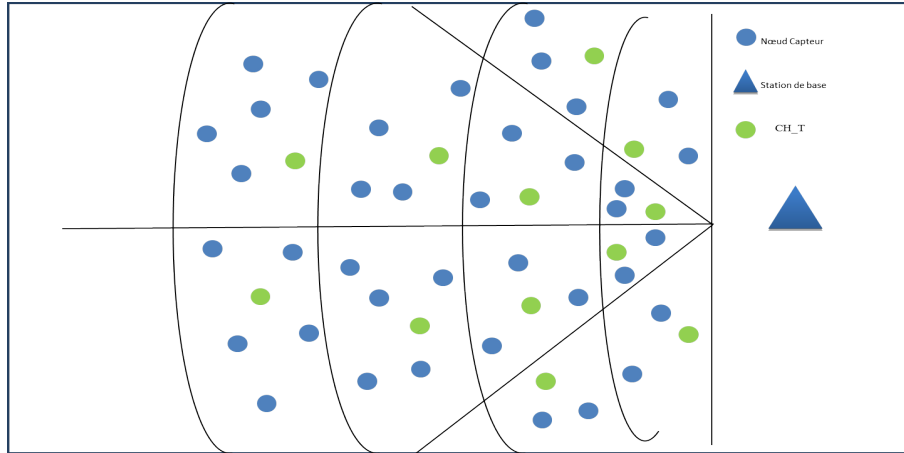


FIGURE 4.3 – Désignation des CH\_T

Les messages utilisés dans cette phase, sont des messages de taille petite, avec un petit ID et un entête qui les distinguent comme message d'annonce. Comme le protocole LEACH, afin de minimisé la probabilité des collisions entre les messages au cours de la phase d'installation, CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) est utilisé comme couche MAC du protocole [31]. La station de base envoie les règles de temps de communication, avec la technique d'ordonnancement TDMA (*Time Division MultiAccess*) pour affecter des times slot (*schedule*) pour chaque nœud de chaque cluster.

L'algorithme qui résume la phase d'intllation est donné comme suit (figure 4.4).

```

Soit les nœuds  $i, j$  et SB la station de base ;
Soit  $V_j$  la table des voisins des nœuds  $i$  ;
Soit  $mon\_num\_couche$  : variable pour stocker le numéro de couche assignée à chaque nœud ;
Soit  $mon\_num\_zone$  : variable pour stocker le numéro de zoné assigné à chaque nœud ;
Soit  $R_i$  : la portée du nœud  $i$  ;
Soit  $K, c$  des compteurs ;
Soit  $\alpha_0$  : variable intermédiaire initialisée à 0 ;
Soit  $nonTermine$  variable booléenne initialisée à vrai ;
Soit  $nbzone$  : égale  $180/4$  ;

 $K \leftarrow 1$  //Initialisation du compteur  $K$  à 1 ;
Tant que  $(la\ distance\ (i, SB) > K * R_i)$  Faire
//Incrémenter la valeur du compteur  $k$ 
     $K \leftarrow K + 1$  ;
Fin tant que
//Mise à jour sur la valeur du  $num\_couche$ 
 $Mon\_num\_couche \leftarrow mon\_num\_couche + K$  ;
 $c \leftarrow 1$  : Initialisation du compteur  $c$  à 1 ;
Tant que  $(c \leq nbzone\ et\ non\ Termine)$  faire
    Si  $(\alpha_0 \leq 180)$ 
         $non\ Termine \leftarrow faux$  ;
    Fin si
     $c \leftarrow c + 1$  ;
     $\alpha_0 \leftarrow \alpha_0 + 45$  ;
Fin tant que
 $Mon\_num\_zone \leftarrow c$  ;
//Le nœud  $i$  informe ses voisins en diffusant un paquet Hello contenant ses informations.
Diffuser le paquet Hello ;
Lors de la réception d'un paquet Hello par  $j$  depuis le nœud  $i$ 
    Si  $(i \notin V_j)$  Alors
        Ajouter une entrée pour  $i$  dans  $V_j$  ;
    Sinon
        Mettre à jour les informations de  $i$  ;
    Fin Si
Fin tant que

```

FIGURE 4.4 – Algorithme de la phase d'intallation.

À la fin des deux étapes, chaque cluster est fixé sur un niveau et une zone, un CH\_T est désigné aléatoirement par la station de base afin d'alléger le travail sur le CH principale qui sera élu dans la phase suivante.

#### 4.2.3.2 Phase d'élection des CHs

Les nœuds capteurs qui se situent dans la même zone et même niveau et possèdent un même identifiant  $ID\_niveau$  et un même identifiant  $ID\_zone$  envoient un message pour commencer l'élection du CH du cluster. Le message contient l'identifiant du nœud et sa note  $N_i$  calculée suivant les deux métriques, énergie résiduelle et distance par rapport à la station de base, calculer suivant la formule (4.2).

$$N_i = \frac{Er}{\sum_{k \in membreC} Er_k} + \frac{Dist\_SB}{\sum_{k \in membreC} Dist\_SB_k} \quad (4.2)$$

Où :

$E_r$  : Énergie résiduelle du nœud capteur ;

$E_{r_k}$  : Énergie résiduelle des voisins du nœud  $i$  ;

$Dist\_SBi$  : Représente la distance sépare le nœud  $i$  de la SB ;

$Dist\_SBk$  : La distance des voisins du nœud  $i$ .

membrC :Les noeuds membre du groupe.

A la réception des messages par le CH\_T, celui-ci désigne comme CH le nœud possédant le note  $N_i$  maximale, en cas d'égalité, un autre paramètre est pris en compte, ce dernier est l'identité minimale des nœuds. Le choix du CH\_T prochain est pris selon la note  $N_i$  inferieure par rapport à la note  $N_i$  du CH actuel (figure 4.5).

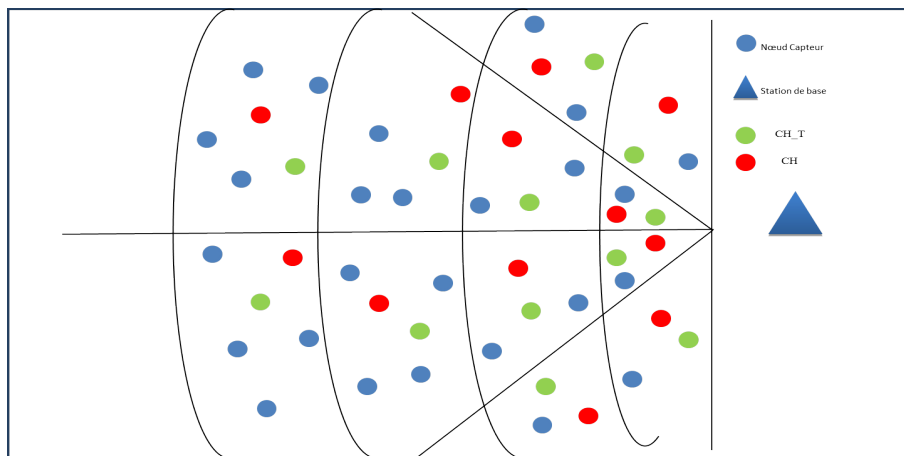


FIGURE 4.5 – Élection des CHs

A la fin de cette phase, le CH\_T envoie un paquet appelé (round start) pour déclencher le prochain tour. L'élection des CHs et CH\_T est détaillée par l'algorithme d'élection des CHs et CH\_T(figure 4.6).

```

Soit  $i$  un nœud dont le numéro de couche égale à  $C_i$  et numéro de zone  $Z_i$  ;
Soit CH, CH_T : variables booléennes utilisées pour indiquer le statut du nœud ;
Soit max1_Ni : fonction qui retourne vrai si la note  $N_i$  est maximal ou minimal ;
Soit max2_Ni : fonction qui retourne vrai si la note  $N_i$  est maximal ou minimal ;

Fonction décider CH ( ) // pour un nœud  $i$ 
  Si ( $N_i > \text{max1\_Ni}$ ) alors
    ECH  $\leftarrow$  vrai ;
  Sinon // Ce n'est pas un Cluster Head
    ECH  $\leftarrow$  faux ;

  Si ( $N_i \leq \text{max2\_Ni}$ ) alors
    ECH_T  $\leftarrow$  vrai ;
  Sinon // Ce n'est pas un CH_T
    ECH_T  $\leftarrow$  faux ; // nœud ordinaire

  Fin si
Fin si
Fin

```

FIGURE 4.6 – Algorithme d'élection des CHs et CH\_T.

#### 4.2.3.3 Phase de transmission

Cette phase assure la collecte et l'acheminement des données vers la SB, en utilise le multi saut pour minimiser l'énergie des nœuds capteurs et augmenter la durée de vie du réseau. Afin d'éviter les collisions des données lors des transmissions des données par les nœuds capteurs au moment des captures, nous utilisant l'ordonnancement avec TDMA (*Time Division Multiple Access*), qui alloue aux nœuds membres d'un cluster des temps durant lequel des portions de temps (*time slot*) pour émettre leurs données sans risque de collision (voir figure 4.7). Le calendrier des temps est envoyé par le nœud capteur CH\_T à tous les membres du groupe pour le tour actuel.

Au moment de capture de données par un capteur, il l'envoie au CH du cluster puis ce dernier fait une agrégation des paquets reçus afin d'éviter une surconsommation d'énergie.

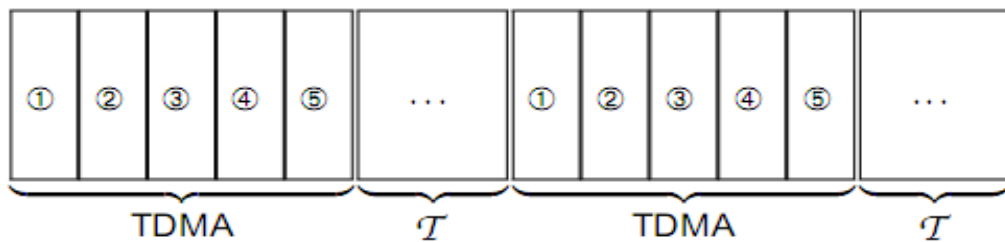


FIGURE 4.7 – Ordonnancement TDMA

- **Algorithme de recherche de relais**

La station de base déclenche cette phase par un envoi d'un message de découverte vers le premier niveau du réseau (en utilisant une portée étendue), seuls les CHs (clusterheads) traitent ce type de messages et les font suivre. Afin d'assurer un chemin optimal, nous nous basant sur deux métriques qui sont :

- **Coût** : sert à déterminer par la suite les meilleurs nœuds à utiliser pour acheminer les données selon l'énergie résiduelle du nœud capteurs.
- **Dist\_BS** : sert à éviter les boucles lors de déroulement de la phase de recherche de relais. Il sert à estimer la distance séparant les CHs de la station de base. En effet, selon la force du signal reçu et connaissant la portée utilisée, le chef  $CH_i$  estime la distance  $d_1$  le séparant de l'émetteur du message de découverte ( $CH_j$ ). Si  $(d_1 + dist_{BS}(CH_j))$  est inférieure à  $dist_{BS}(CH_i)$  (initialement de valeur infinie),  $CH_i$  traite le message reçu et met à jour sa valeur  $dist_{BS}$  qu'il fera suivre avec son message de découverte.

- **Principe de L'algorithme**

La station de base diffuse un message de découverte avec comme paramètres son identifiant (ID), les champs coût et  $dist_{BS}$  initialisés à 0.

$$Cout(BS) = 0, dist_{BS} = 0 \quad (4.3)$$

Les CHs ne font suivre ces messages que si leurs émetteurs sont plus proches qu'eux de la station de base selon le paramètre  $dist_{BS}$ . À la réception d'un message de découverte, le Clusterhead  $CH_j$  met à jour le coût total du chemin. Ainsi si le message est reçu du  $CH_i$ , alors

$$C_{CH_i, CH_j} = cout(CH_i) + \frac{Rr(CH_j)}{E_{init}} \quad (4.4)$$

Nous utilisant les probabilités de sélection des nœuds relais, et après le calcul du  $C_{CH_j, CH_i}$  selon la formule (1), tous les CHs voisins sont ajoutés à la table de relais  $RT_j$  du chef  $CH_j$ .

$$RT_j = \begin{cases} i, & \text{CHi voisins plus proche} \\ & \text{de la station de base.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Cette approche se base sur l'utilisation des probabilités pour le choix du chemin. Où CHi va assigner une probabilité à chacun de ces chefs voisins dans sa table de relais  $RT_j$ . Cette probabilité est inversement proportionnelle au coût.

$$P_{CH_i, CH_j} = \frac{\frac{1}{C_{CH_j, CH_i}}}{\sum_{k \in RT_j} \frac{1}{C_{CH_j, CH_k}}} \quad (4.6)$$

Chaque CH dispose par la suite d'un nombre de CHs relais à travers lesquels il peut acheminer les données vers la station de base. Une fois l'échange de messages de découverte s'achève, le chef  $CH_j$  calcule le coût moyen d'atteindre la station de base.

$$cout(CH_j) = \sum_{i \in RT_j} P_{CH_j, CH_i} * C_{CH_j, CH_i} \quad (4.7)$$

Ce coût moyen est mis dans le champ coût et est transmis avec le message de découverte. La fin de cette phase est marquée par l'expiration d'un temporisateur  $t$  dont la valeur est choisie de manière à assurer que les messages de découverte circulent tout au long du réseau et dont la valeur dépend du diamètre du réseau.

### 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.

La simulation connaît de nos jours un essor considérable. Ceci est dû aussi bien à l'intérêt théorique que présente la modélisation des systèmes simulés, qu'au besoin croissant de simuler, par ordinateur, des réalisations de plus en plus complexes. Nous constatons, en effet, que les conditions d'expérimentation sont aujourd'hui toujours plus difficiles et plus coûteuses ; nous avons recours donc de plus en plus à l'expérimentation indirecte, notamment aux techniques de simulation. Celles-ci consistent à représenter la réalité simulée sur ordinateur, en mettant en évidence les progrès spectaculaires de l'infographie, à donner à celle-ci des moyens de perceptions réalisés artificiellement, puis à simuler son fonctionnement [24].

Nous distinguons plusieurs modèles de simulation selon qu'ils soient déterministes ou aléatoires, continus ou discrets. Pour expérimenter la solution proposée, nous avons choisi d'utiliser un outil de simulation qui est MATLAB. Cette décision a été prise après l'étude des simulateurs de RCSFs existants (NS-2, OMNet++, Glomosim, SENSE, TOSSIM, BOIDS et Shawn), qui étaient pour la plupart beaucoup trop lourds, difficile à maîtriser dans des délais aussi courts et qui sont peu adaptés à nos besoins[24].

### 4.3.1 Aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs

Ils existent plusieurs simulateurs dédiés pour les réseaux de capteurs :

- **OPNET** (*Optimum NETWORK Performance*) : Comme NS, OPNET est un simulateur à événements discrets. C'est un outil très puissant pour la simulation et l'évaluation de performances des réseaux. Il permet aussi à l'utilisateur de construire ses propres modèles des plus simples aux plus complexes[83] ;
- **NS-2/NAM** (*Network Simulator 2*) : C'est un simulateur développé à Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Le langage de base de NS est le C++. L'outil NAM (Network Animator), associé au simulateur NS, permet de visualiser des animations de la simulation (transfert des paquets d'un nœud à un autre, taille des paquets, remplissage des listes d'attente, etc.) ;
- **TOSSIM** : Est le simulateur de TinyOs créé par l'université de Berkeley. Il permet de simuler le comportement d'un capteur (envoi/réception de messages via les ondes radios, traitement de l'information, etc.) au sein d'un réseau de capteurs. Pour une compréhension moins complexe de l'activité d'un réseau, TOSSIM peut être utilisé avec une interface graphique, TinyViz, permettant de visualiser de manière intuitive le comportement de chaque capteur au sein du réseau.

### 4.3.2 Le choix de MATLAB

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

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

MATLAB contient une interface graphique puissante, et on peut l'enrichir en ajoutant des "boîtes à outils" (toolbox) qui sont des ensembles de fonctions supplémentaires, profilées

pour des applications particulières (traitement de signaux, analyses statistiques, optimisation, etc.).

MATLAB contient également un langage de programmation de haut niveau dans lequel nous retrouvons la majorité des concepts des langages de programmation modernes (types Pascal et C). L'ordre d'exécution des instructions est déterminé par des structures de contrôle. Il permet aussi la création de fonctions et distingue les données locales des données globales. Ces avantages ont rendus de MATLAB, un langage de programmation et de simulation très sollicité [52].

### 4.3.3 Métriques de performances

Afin de mesurer l'efficacité énergétique de notre protocole MUEEPSCZ, nous allons le comparer avec le protocole amélioré EEPSC. Notre comparaison va se focaliser essentiellement sur les points suivants :

- **Le minimum des énergies résiduelles (ME)** : Dénote l'énergie résiduelle minimale depuis l'énergie initiale ( $E_{init}$ ) de tous les nœuds dans le réseau à la fin de simulation.
- **Taux de succès (TS)** : Mesure le taux de livraison de paquets ou bien le nombre de paquet de données qui est réceptionné par la station de base avec succès.
- **La fonction énergétique (S)** : Mesure la quantité d'énergie consommée par rapport au taux de données envoyées dans le réseau. Elle prend en compte à la fois la fiabilité des transmissions des données et la consommation énergétique dans le réseau. Elle est calculée comme suit [?, ?, 16] :

$$S = \frac{TS}{(1 - ME/E_{init})} \quad (4.8)$$

### 4.3.4 Étapes de réalisation du simulateur

Les étapes de réalisation de notre simulateur sont les suivantes :



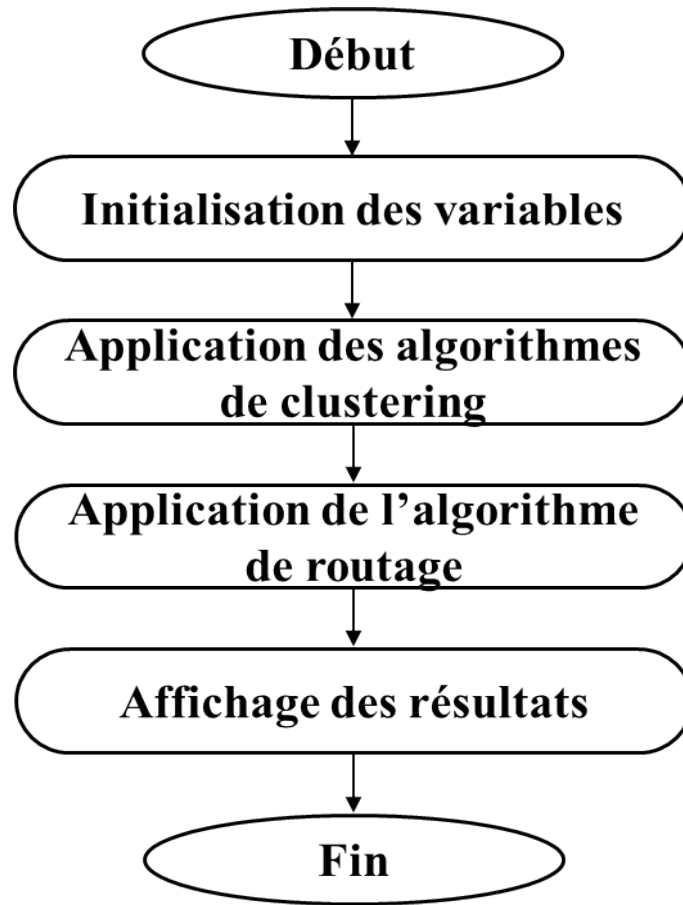


FIGURE 4.8 – Étapes de simulation.

- **Initialisation des variables** : cette étape correspond à la déclaration des variables globales (nombre de capteurs, surface du terrain simulé, nombre de tests et d'exécutions à réaliser ...), leur initialisation, la création des capteurs (portée de transmission, capacité énergétique, capacité mémorielle, capacité calculatoire des capteurs) et leur déploiement aléatoire sur le terrain simulé.

Pour simuler sous MATLAB notre protocole, le déploiement des nœuds est fait d'une manière aléatoire sur une surface de capture (surveillance) de (100X100) m<sup>2</sup>. Chaque capteur dans le réseau est représenté par ses coordonnées (x, y). Par défaut, la station de base prend les coordonnées (50, -75) afin de simplifier les calculs.

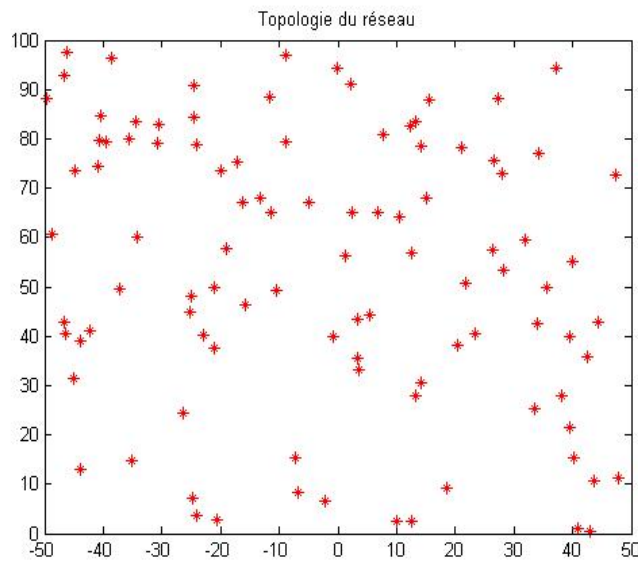


FIGURE 4.9 – Déploiement des noeuds.

- **Application des algorithmes de clustering** : cette étape concerne la détermination des groupes (clusters) grâce à la station de base et des différents messages circulant dans le réseau (vecteur de données, note, . . .).
- **Application de l’algorithme de routage** : cette étape correspond à la sélection du chemin de routage de l’information vers la station de base, à la détection d’un évènement à partir d’un nœud capteur quelconque. Une exécution des différentes phases des deux algorithmes (EEPSC et MUEEPSZ) implémentés.
- **Affichage des résultats** : les courbes obtenues (résultats de la phase précédente) serviront à comparer les protocoles implémentés selon les critères d’évaluation de performances choisis (Moyenne d’énergie consommée, Taux moyen de livraison de paquets, Durée de vie du réseau).

### 4.3.5 Modèle de simulation

Le système considéré est basé sur l’approche événementielle. La simulation par événements discrets [58] désigne la modélisation d’un système réel tel qu’il évolue dans le temps, par une représentation dans laquelle les grandeurs caractérisant le système (variables) ne changent qu’en un nombre fini ou dénombrable de points isolés dans le temps. Ces points sont les instants où se passent les événements.

Dans ce qui suit, nous détaillerons le modèle de simulation du système considéré.

### 4.3.5.1 Description du système

Notre système représente une zone de capture d'une surface de  $(100 \times 100) \text{m}^2$  comportant 100 capteurs et une station de base. De ce fait, les entités de notre système, ainsi recensées, sont :

- **La station de base** : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau.
- **Les Nœuds capteurs** : ils servent à détecter les événements et participent au routage des informations dans le réseau.

Le modèle réseau utilisé consiste en un ensemble de capteurs sans fil, immobiles, aléatoirement dispersés sur le terrain simulé et présentant des caractéristiques différentes en mémoire et en puissance de traitement et dont l'énergie initiale de chacun d'entre eux est fixée à 2 joules.

### 4.3.5.2 Modèle d'énergie

Le modèle radio (voir figure 4.6) proposé par Heinzelman et al [88]. a été utilisé pour calculer l'énergie consommée en émission et en réception des messages. Selon ce modèle l'énergie consommée pendant la transmission ( $E_e$ ) d'un message de  $p_k$  bits est donnée par :

$$E_e = E_{elec} \times P_k + E_{amp} \times P_k \times d^2 \quad (4.9)$$

Alors que l'énergie consommée pendant la réception ( $E_r$ ) d'un message de  $p_k$  bits est donnée par :

Où :

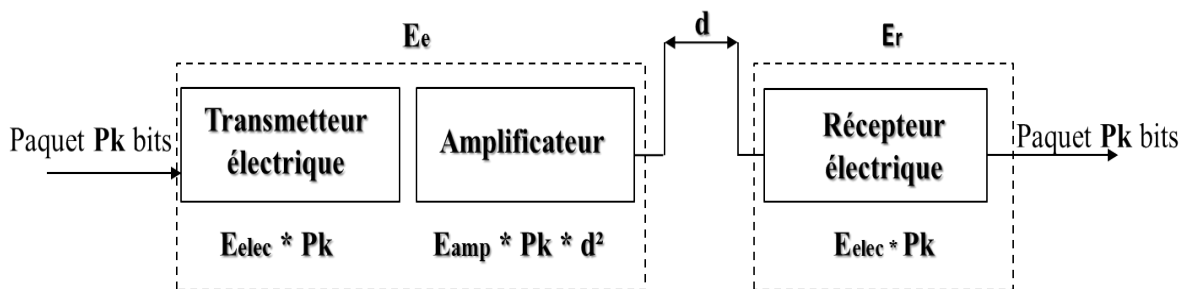


FIGURE 4.10 – Modèle d'énergie.

- $E_e$  est l'énergie consommée en émission.
- $E_r$  est l'énergie consommée en réception.

- $E_{elec}$  est l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique) dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.
  - $E_{amp}$  est l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur) dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.
  - $P_k$  est la taille en bit d'un paquet de données.
  - $d$  est la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.
- L'énergie nécessaire à l'agregation des données est fixé a  $E_{DA}=5nJ/bit/signal$ .

#### 4.3.5.3 Variables descriptives du système

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

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Unité de mesure
Energie consommée lors de l'émission d'un message	$E_e$	Réel	Joule
Energie consommée à la réception d'un message	$E_r$	Réel	Joule
Energie consommée lors du traitement d'un message	$E_t$	Réel	Joule
Position d'un capteur	$(x,y)$	(Réel,réel)	(Mètre, mètre)
Distance entre deux capteurs	$d$	Réel	Mètre

TABLE 4.1 – Variables descriptives du système.

- **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 :

$$E_c = E_c - E_x \begin{cases} E_x = E_e, & \text{Si le capteur envoie un message;} \\ E_x = E_r + E_t, & \text{Si le caoteur reçoit un message.} \end{cases} \quad (4.10)$$

- **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  $(x_0, y_0)$  :

$$d = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4.11)$$

### 4.3.6 Evaluation de performances

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de simulations obtenus suivant les métriques discutées précédemment. Pour chaque test, 50 exécutions indépendantes sont réalisées : les résultats présentés moyennent les résultats de toutes les exécutions.

Pour les simulations réalisées, le paramètre variable utilisé est la portée de chaque capteur : augmenter la portée d'un capteur est alors équivalent à augmenter la densité du réseau ; il aurait donc été équivalent d'utiliser la surface du réseau pour variable.

#### 4.3.6.1 Moyenne d'énergie consommée (MEC)

Sur la figure 4.11, on peut voir que le protocole MUEEPSCZ, surperforme le protocole EEPSC en marquant jusqu'à moins de 10% de moyenne d'énergie consommée ( pour 100 nœuds par exemple) par rapport au protocole EEPSC. Ce gain en énergie est grâce à l'équilibrage dans la distribution de la charge qu'a présenté MUEEPSCZ entre les CHs des différentes couches ainsi qu'aux différentes techniques utilisées dans la formation des clusters et le choix des nœuds CHs et CH\_T. Ces techniques prennent en compte les paramètres influant sur la bonne gestion de la ressource énergétique à savoir l'énergie résiduelle et la distance par rapport à la station de base.

En outre, les techniques de transmission utilisées entre les nœuds pour router les données à la station de base dans le protocole MUEEPSCZ contrôle efficacement l'énergie de transmission en adoptant un routage multi-sauts avec des mécanismes pour choisir les meilleurs nœuds relais pour réaliser ce routage. Or, le routage de données dans le protocole EEPSC est effectué via un seul saut ce qui consomme beaucoup d'énergie pour atteindre la station de base.

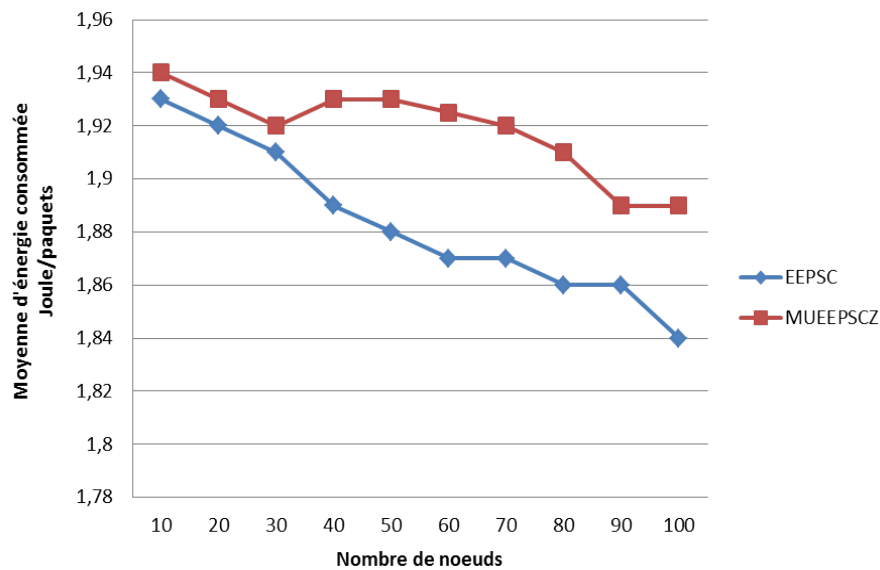


FIGURE 4.11 – Moyenne d'énergie consommée (MEC)

#### 4.3.6.2 Taux moyen de livraison de paquets

Comme l'illustre la figure 4.12, le taux moyen de livraison de paquets pour les protocoles EEPSC, MUEEPSCZ varie entre 20% et 21% avec un léger avantage marqué par le protocole MUEEPSCZ par rapport au protocole EEPSC. Ces résultats sont raisonnables en traduisant bien l'efficacité de la politique de communication adoptée dans le protocole MUEEPSCZ en acheminant les paquets de données par plusieurs sauts. En effet, la densification du réseau augmente le nombre de voisins par nœud ce qui offre une variété dans le choix de relais utilisés dans la transmission des paquets de données à la station de base et augmente ainsi le taux de succès pour l'atteindre. Par ailleurs, nous pouvons bien constater que le protocole EEPSC est influencé par la densité du réseau et son taux de paquets livrés avec succès pour la station de base diminue en augmentant le nombre de nœuds déployés dans le réseau. Ceci est dû principalement au type de communications utilisées entre les Chs et la station de base qui sont établies via un seul saut, ce qui engendre plus de collisions entre les paquets de données dans le réseau avec comme résultat un TMLP plus bas.

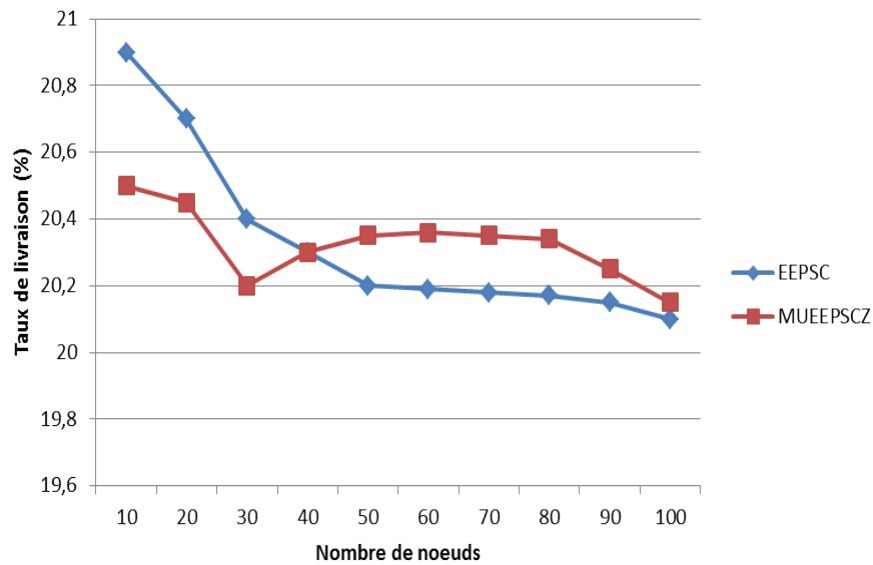


FIGURE 4.12 – Taux moyen de livraison de paquets

#### 4.3.6.3 Durée de vie du réseau

Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction de nombre de nœuds déployés, nous avons suivi l'évolution de 100 nœuds dans le temps. La figure 4.13 présente la durée de vie du réseau en fonction du temps afin d'examiner l'efficacité des protocoles EEPSC et MUEEPSCZ à maximiser la durée de vie des nœuds capteurs et, par conséquent, celle du réseau entier.

Il est clair, que la durée de vie du réseau offerte par le protocole MUEEPSCZ surpasse celle du protocole EEPSC. L'explication à cela est la même que celle donnée pour commencer les résultats du test de moyenne d'énergie consommée.

En effet, la prise en compte de la contrainte énergétique en adoptant la métrique d'énergie résiduelle dans les poids de sélection des nœuds CHs et CH\_T, la formation des clusters ainsi que dans le choix des nœuds relais utilisés dans la transmission des données à la station de base à apporter un équilibre dans la consommation d'énergie des nœuds sélectionnés CHs permettant ainsi d'allonger leur durée de fonctionnement et donc augmenter la durée du réseau entier.

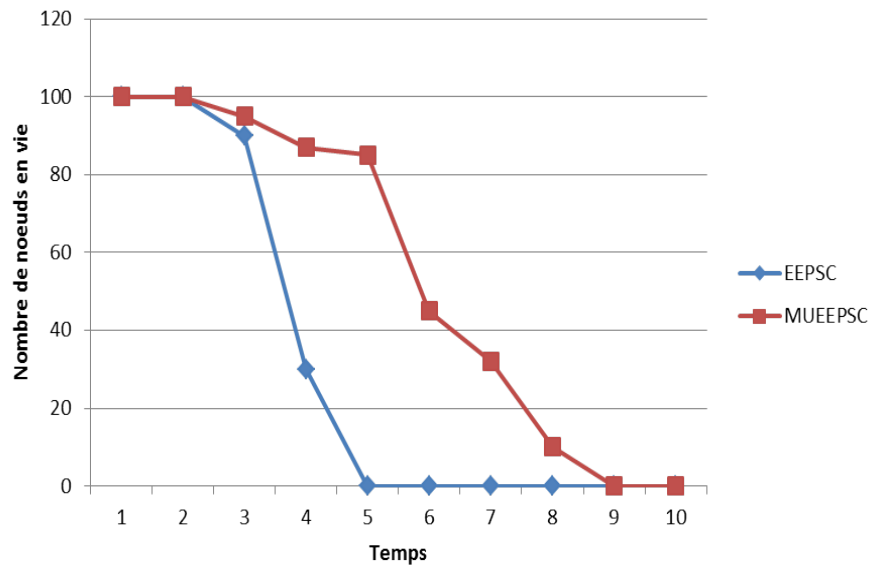


FIGURE 4.13 – Durée de vie du réseau

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé protocole MUEEPSCZ en exposant son principe de fonctionnement, les mécanismes utilisés pour la structuration du réseau et expliquer les étapes de communication des données vers la station de base. Notre protocole résout le problème du point chaud en utilisant le mécanisme de recherche des relais, et le problème de la transmission direct par le multi saut.

L'étude comparative menée par la simulation entre les performances des deux protocoles (EEPSC et MUEEPSCZ), ont été évaluées en fonction de la durée de vie du réseau, taux de livraison des paquets et la moyenne d'énergie consommée. Les résultats observés donnent un avantage à notre protocole, l'efficacité énergétique de notre approche a été démontrée comparant ses performances à EEPSC, cette efficacité est obtenue grâce aux techniques de gestion d'énergie utilisé qui permet d'équilibré la consommation d'énergie des différents capteurs.



# Conclusion générale et Perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil sont en plein développement, et deviennent de plus en plus répandus. Actuellement, ils constituent un thème de recherche très dynamique, tiré vers le haut, par leurs utilisations dans divers domaines. En effet, leurs applications sont de plus en plus nombreuses et diversifiées. Elles peuvent être classées principalement en applications militaires, applications environnementales, applications médicales et la domotique.

Une problématique majeure dans les réseaux de capteurs, est la maîtrise de l'énergie consommée par chaque nœud capteur. En effet, chaque nœud capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie), pour alimenter tous ses composants. Cependant, en raison de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée, et généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, parce qu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et du réseau en entier. Aussi, pour qu'un réseau de capteurs ait une longévité maximale, il faut que la consommation d'énergie soit prise en compte à tous les niveaux de l'architecture réseau.

Le routage est un service très important dans les réseaux de capteurs, il doit permettre l'arrivée des données à un nœud puits avec le minimum de pertes et de dissipation d'énergie.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la problématique de l'économie d'énergie lors du routage dans les réseaux de capteurs sans fil, et l'amélioration de la durée de vie de ce type de réseaux. Pour cela, nous avons fait un état de l'art sur les approches du routage dans les RCSFs, et une étude sur les métriques mesurant l'efficacité énergétique de ces protocoles.

Nous avons contribué par la proposition de *MUEEPSCZ* qui est un protocole de routage à basse consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil, nous l'avons intégré dans le simulateur, ensuite, simulé et comparé le protocole proposé avec le protocole *EEPSC*. La comparaison est faite selon deux critères de performance qui sont : la consommation énergétique et la durée de vie du réseau. Les résultats obtenus confirment que

*MUEEPSCZ* est bien meilleur que l'autre protocole (en terme de la durée de vie du réseau).

En effet, le protocole *MUEEPSCZ* utilise des techniques permettant de réduire l'utilisation des nœuds les plus sollicités dans le réseau, ceci est réalisé par la diminution de la probabilité du choix des chemins en commun et l'envoi direct à la station de base, permettant ainsi, d'équilibrer la consommation énergétique de tous les nœuds, et par conséquent, augmenter la durée de vie de tout le réseau.

### **En guise de Perspectives :**

Comme très souvent, le travail que nous avons effectué ouvre de nouvelles perspectives, permettant de le compléter de différentes manières.

- Le protocole que nous avons élaboré s'applique sur les réseaux ayant une structure hiérarchique horizontale avec une technique de clustering statique ce qui engendre des problèmes dans le cas de la mobilité des noeuds. Ce dernier peut être résolu par une technique de clustering dynamique.
- Essayer d'obtenir les résultats de la simulation en implémentant le nouveau protocole sous d'autres simulateurs comme Network Simulator 2, OPNET, GloMoSim...etc.
- Enfin, mettre en pratique le protocole *MUEEPSCZ* (*Multi-Hop Unequal Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones*) dans une application réelle des réseaux de capteurs.

# Bibliographie

- [1] A. A. ABBACI AND M. YOUNIS, *A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks*, 2007.
- [2] M. ACHIR AND L. OUVRY, *A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks multipath source routing protocol (MPSR)*, Ile de la Réunion. ICN05 : 4th International Conference on Networking (IEEE).
- [3] A. AHMED ABBASI AND M. YOUNIS, *A survey on clustering algorithms for wireless sensor networksX*, 2007.
- [4] K. AKKAYA AND M. YOUNIS, *A Routing Protocol for wireless ah-doc sensor networks : Multi-Path Source Routing Protocol (MPSR)*, ICN' 05 : 4th International Conference on networking (IEEE), Ile de la Réunion.
- [5] I. AKYILDIZ AND ALL, *Wireless sensor networks : a survey*, BWNL, SECE, GIT, Atlanta, USA, 2001.
- [6] I. AKYILDIZ AND ALL., *A survey on sensor networks*, Magasine de communication IEEE, 2002.
- [7] AL-KARAKI AND ALL, *Data aggregation and routing in Wireless Sensor Networks : Optimal and heuristic algorithms*, Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2009.
- [8] AL-KARAKI, N.JAMAL, AND ALL, *Data aggregation in wireless sensor networks - exact and approximate algorithms*, High Performance Switching and Routing, HPSR 2004, 2004.
- [9] J. AL-KARAKI AND A.E.KAMAL, *On the Correlated Data Gathering Problem in Wireless Sensor Networks.*, Ninth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'04).
- [10] G. ANTOINE, *Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface*, Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille,, 2007.
- [11] B. AURÉLIEN, *Optimisation de la consommation des nœuds de réseaux de capteurs sans fil*, Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2008.

- [12] S. BANDYOPADHYAY AND C. E.J, *An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks*, INFOCOM, pp. 1713-1723, 2003.
- [13] K. BENAHMED, *La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil*, 2006.
- [14] K. BEYDOUN, *conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*, thèse de doctorat, u.f.r des sciences et techniques de l'université de FRANCHE-COMTE, 2009.
- [15] K. BOUABDELLAH, *Problématique de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat LIUPA, université d'Oran, 2007.
- [16] S. BOULEFKHAR, *Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs*, Thèse Magister ReSyd Béjaia. Algérie, 2006.
- [17] E. CAYIRCI AND Y. S. SUBRAMANIAM, *wireless sensor networks : a survey*, Computer networks, vol 38, 2002.
- [18] Y. CHALLAL, *Réseaux de capteurs sans fil*, cours, 2008.
- [19] J. H. CHANG AND L. TASSIULAS, *Maximum lifetime routing in wireless sensor networks*, Proceeding in IEEE/ACM Transaction on Networking, 12(4).
- [20] J. DECHENE AND ALL, *A Survey of Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks*, 2007.
- [21] A. DI CARO", *Analysis of simulation environments for mobile ad hoc networks*, Technical Report IDSIA-24-03, Dalle Molle Institute for Artificial Intelligence, Switzerland.
- [22] M. DIVAY, *La programmation objet en java*, EYROLLES, 2006.
- [23] D. DUCHAMP AND N. REYNOLDS, *Mesure performance of wireless lan*, Technical Report, United States, 1992.
- [24] P. ERARD AND P. DEGUENON, *Simulation par évènements discrets*, Presses polytechnique et universitaire Romandes, 1996.
- [25] Y. FA HUNG AND ALL, *Performance of Energy Efficient Relaying for Cluster-Based Wireless Sensor Networks.*, 2007.
- [26] K. FELLAH, B. KECHAR, AND Y. LEBBAH, *Techniques d'optimisation de la consommation d'énergie électrique dans les réseaux de capteurs sans fil*, Université d'Oran EsSénia, 2007.
- [27] L. K. H. TAKAGI, *Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 32, no. 3.
- [28] T. HE AND AL, *SPEED : A stateless protocol for real-time communication in sensor networks*, in the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, 2003.

- [29] W. HEINZELMAN AND ALL., *An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks*, IEEE Transactions Wireless Communications, Vol. 1, 4, pp. 660-670.
- [30] W. HEINZELMAN AND ALL, *Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks*, Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, Vol. 2, p. 10, 2000.
- [31] W. B. HEINZELMAN AND ALL, *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks*, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 1, no. 4, pp. 660-70.
- [32] W. R. HEINZELMAN AND ALL, *Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks*.
- [33] [HTTP ://WWW.CDC.ORG/INDEX.ASP.](http://www.cdc.org/index.asp), 2011.
- [34] HUYNH AND ALL., *An Energy\* Delay Efficient Multi-Hop Routing Scheme for Wireless Sensor Networks*, IEICE - Transactions on Information and Systems. Vol. E89-D, 5, 2006.
- [35] T. IMIENLINSKI AND B. BADRINATH, *Mobile wireless computing : solutions and challenges in data management*, CACM, 1994.
- [36] C. T. INC, [http ://www.xbow.com/](http://www.xbow.com/).
- [37] C. INTANAGONWIWAT AND ALL., *Directed diffusion : a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*, In Proc. ACM Mobicom, Boston, USA, 2000.
- [38] S. JAIN, *Energy Aware Communication in Ad-hoc Networks*, Technical Report UW-CSE, 2003.
- [39] J.CARTIGNY, *Contribution à la diffusion dans les réseaux ad hoc*, Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie de Lille.
- [40] D. . JOHNSON AND AL, *Mobile Computing*, Editions : T. Imielinski et H. Korth., Mobile Computing, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [41] H. KARL AND A. WILLIG, *A short survey of wireless sensor networks*, Telecommunication Networks Group Technische University at Berlin, 2003.
- [42] K.BEYDOUN, *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*, Mémoire pour l'obtention du grade de docteur de l'université de FRANCHE COMPTE En informatique, 2009.
- [43] L. KHELLADI AND N. BADACHE, *Les réseaux de capteurs : état de l'art*, Rapport de Recherche, Faculté Electronique et Informatique Bab Ezzouar-Algérie, 2004.
- [44] A. LAOUITI AND C. ADJIH, *Mesures de performances du protocole OLSR*, Projet Hipercom. Rapport technique, 2003.

- [45] M. LEHSAINI, *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique.*, . s.l. : UFC,, 2009.
- [46] M. LEHSAINI AND ALL, *An Efficient Cluster-based Self-organization Algorithm for Wireless Sensor Networks.*, IJSN, International Journal of Sensor Networks., 2008.
- [47] —, *A novel cluster-based self-organization algorithm for wireless sensor networks.*, IEEE International Symposium on Collaborative Technologies and Systems (CTS 2008)., May.
- [48] R. C. S. LINDSAY, S. AND K. M. SIVALINGAM, *Data Gathering in SEnsor Networks using the Energy Delay Metric*, IEEE COnputer Society. 15th international Parallel Amp ; Distributed Processing Symposium [éd.]. p. 188.
- [49] R. MAKHLOU AND S. MOUAD, *Etude et comparaison des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire d'ingénieur, université de Béjaia, 2007.
- [50] MANJESHWAR AND ALL, . *APTEEN : A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks*, 2003.
- [51] A. MANJESHWAR AND ALL, *TEEN : a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks*, Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001.
- [52] A. A. MANUEL, *Atelier d'outils informatiques pour la physique (InfoPhys), Eléments de MATLAB*, Département de la Physique de la Matière Condensée, université de Genève, 15.
- [53] R. MARIN-PERIANU, *Wireless Sensor Networks in Motion : Clustering Algorithms for Service Discovery and Provisioning*, thèse de doctorat, University of Twente, 2008.
- [54] N. MEJRI AND F. KAMOUN, *Algorithme de Routage Hiérarchique MHEED à Plusieurs Sauts pour Les Grands Réseaux de Capteurs*, 4th International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 25-29,TUNISIA, 2007.
- [55] M.KHELIFI, *Optimisation de la consommation de l'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire pour l'obtention du grade de Magistère en informatique, Université Abderahmane Mira de Béjaia, 2007.
- [56] L. MOHAMED, *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique*, thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2009.
- [57] M.YE AND ALL, *An Energy Efficient Clustering Scheme in WSN*, National Laboratory of NovelSoftware Technology, Nanjing University, Chiana, 2002.
- [58] N.KHOULALENE, *Regroupement avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil*, thèse de magistère, Université Abderahmane Mira de Béjaia.

- [59] C. E. PERKINS AND E. M. ROYER, *Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing*, Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999.
- [60] J. POTTIE AND J. KAISER, *Wireless integrated network sensors*, Communications of the ACM, Vol. 43, No. 5, pp. 51-58, 2002.
- [61] T. B. PROJECT, <http://www.red3d.com/cwr/boids/>.
- [62] J. A. Q. LI AND D. RUS, *Hierarchical power-aware routing in sensor networks*, In Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking, May.
- [63] A. QAYYUM AND ALL, *Multipoint relaying : An efficient technique for flooding in mobile wireless networks*, s.l. : INRIA. Reaserch report, 2000.
- [64] J. P. R. DRAVES AND B. ZILL, *Comparison of routing metrics for static multi-hop Wireless networks*, Proceedings of ACM SIGCOM, 2004.
- [65] V. RAGHUNATHAN AND ALL., *Energy-aware wireless microsensor networks*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No. 2, pp. 40-50, 2002.
- [66] V. RAGHUNATHAN AND C. SCHURGERS, *Energy-aware wireless microsensor networks*, IEEE Signal Processing Magazine, 2002.
- [67] D. S. S. KUMAR AND F. ZHAO, *Collaborative signal and information Processing in micro-sensor networks*, IEEE Signal Processing Magazine.
- [68] A. SAVVIDES AND ALL, *Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors*, 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom).
- [69] R. SHAH AND J. M. RABAEY, *Energy aware routing for low energy ad-hoc sensor networks*, page pp. 350-355, Orlando, USA, 17-21. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) Vol. 1.
- [70] D. SIMPLOT-RYL, *Some real time issues in wireless sensor networks*, Technical report, IRCICA/LIFL, Univ. Lille 1 CNRS UMR 8022, INRIA Futurs, Ecole d'été Temps Réel, 2005.
- [71] S. LINDSEY AND S. RAGHAVENDRA, *PEGASIS : Power-efficient gathering in sensor information systems*, IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol. 3, pp. 3-1130, 2002.
- [72] S. MOAD, *La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Etude bibliographique Master 2 Recherche en informatique IFSIC - Rennes 1, France, 2008.
- [73] K. SOHRABI AND J. POTTIE, *Protocols for self-organization of a wireless sensor network*, IEEE Personal Communications, Volume 7, 2000.
- [74] I. STOJMENOVIC AND X. LIN, *Power aware localized routing in wireless networks*, Power, Vol. 12, No. 11, pp. 1122-1133, 2004.

- [75] C. K. TON, *Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad-hoc networks*, volume Vol. 39 of N. 6, pp 138-147. IEEE communications magazine edition.
- [76] A. V. RAGHUNATHAN, *Energy-aware wireless microsensor networks*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No. 2, pp. 40-50.
- [77] A. W. R. HEINZELMAN, *Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks*, 2002.
- [78] W.R.HEINZELMAN AND ALL., *Wireless Sensor Network Protocols*, CRC Hall [éd.], 2005.
- [79] N. XU, *A Survey of Sensor Network Applications*, université de Southern California, 2003.
- [80] Y. XU AND ALL., *Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing*, In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 2001.
- [81] K. YANG, *A study on power-friendly routing protocols for sensor networks*, Technical Report. University of Essex Department of Electronic Systems Engineering.
- [82] —, *A study on power-friendly routing protocols for sensor networks*, Technical Report, University of Essex Department of Electronic Systems Engineering.
- [83] S. YESSAD, *La couche MAC avec contraintes d'énergie et d'équité dans les réseaux de capteurs*, Thèse de magister, université de Bejaia, 2005.
- [84] E. YONEKI AND J. BACON, *A survey of Wireless Sensor Network technologies : research trends and middleware's role*, University of cambrige, rapport technique, 2005.
- [85] Y. YOUNIS AND Y. ISRIG, *Le probleme d'exclusion mutuelle dans les reseaux mobiles ad hoc*, Memoire de Master Reseaux et Systemes distribues, Universite A.Mira de Bejaia, Algerie.
- [86] O. YOUNIS AND ALL, *energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks*, IEEE Transactions on Mobile Computing 03, 2004.
- [87] A. ZAHMATI AND ALL, *An Energy-Efficient Protocol with Static Clustering for Wireless Sensor Networks*, . International journal of Electronics, 2007.
- [88] A. S. ZAHMATI, B. .ABOULHASSANI, AND ALL, *An Energy-Efficient Protocol with Static Clustering for Wireless Sensor Networks (EEPSC)*, International Journal of Electronics, Circuits and Systems Volume 1 Number 2, 2007.
- [89] R. ZITOUNI, *Routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, thèse magister ReSyD, Université de Bejaia, 2006.