

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes  
Département d'informatique



*Mémoire de Master Professionnel*

En informatique

**Option**

Administration et sécurité des réseaux

**Thème**

---

## Le routage hiérarchique à basse consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil

---

Présentée par :

*M<sup>elle</sup>* MADI Hanane

*M<sup>elle</sup>* RILI Yasmine

Encadré par :

*M<sup>r</sup>* SIDER Abderrahmane

Soutenu devant le jury composé de :

Président : *M<sup>r</sup>* TOUAZI Djoudi

Examinatrice : *M<sup>me</sup>* ZIDANI Ferroudja

Promotion 2015/2016

# Remerciements

Nous tenons à remercier celui qui nous a protégé, soutenu et surtout aidé jusqu'à pouvoir « mener la graine au fruit ». Pour son aide et soutien providentiels, nous pouvons dire : « Dieu Merci ».

Nous tenons à dire toute nos gratitudee à notre promoteur Monsieur **SIDER Abderahmane**, pour avoir accepté de nous encadrer au sens propre du terme, puis pour nous avoir fait confiance et pour nous avoir accompagné, encouragé et conseillé au cours de cette année tant sur le plan technique que humain.

Nous tenons également à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger notre modeste travail. Enfin, nous remercions, de tout cœur, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Dédicaces Yasmine

En tout premier lieu, Au nom du dieu "ALLAH" tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leurs soutient et sacrifices, qui ont toujours été la pour moi et qui m'ont donné un magnifique model de labeur et de persévérance tout au long de mes études, qu'ils trouvent ici tous mes profonds remerciements,et que Dieu vous bénisse pour moi.

À ma très chère soeur **A**asma.

À toute ma famille sans exception **O**ncles et **T**antes et **C**ousins.

À la mémoire de mon **G**rand-père.

À tous mes **A**mis.

Et bien sûr, à ma binôme **H**anane avec qui j'ai partagé le meilleur et le pire et sa famille.

À ceux qui cherchent leurs **n**oms ici.

# Dédicaces Hanane

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "Ya Kayoum".

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui m'ont éclairé le chemin de la vie par leur grand soutien et leurs encouragements, par leurs dévouements exemplaires et les énormes sacrifices qu'ils m'ont consentis durant mes études et qui ont toujours aimé me voir réussir. Je les remercie pour tout ce qu'ils m'ont fait. Que Dieu les garde et les protège.

À mes frères : **Abd Rachide, Said, Abd Hafid.**

À mes sœurs : **Souad, Sabrina, Anais, Ousila.**

À mes **Cousins**, mes **Oncles**, tous mes **Amis.**

À ma binôme **Yasmine** qui m'a supporté durant le travail et chez qui j'ai trouvé l'entente dont j'avais besoin et sa famille.

À ceux qui cherchent leurs **noms** ici.

# Table des matières

<b>Table des Matières</b>	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Qu'est-ce qu'un capteur sans fil . . . . .	3
1.3 Architecture d'un nœud capteur . . . . .	4
1.3.1 Unité d'acquisition . . . . .	4
1.3.2 Unité de traitement . . . . .	4
1.3.3 Unité de communication(Transceiver) . . . . .	4
1.3.4 Unité d'énergie . . . . .	4
1.4 Architecture d'un RCSF . . . . .	5
1.5 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	5
1.5.1 Applications militaires . . . . .	5
1.5.2 Applications liées à la sécurité . . . . .	5
1.5.3 Applications environnementales . . . . .	5
1.5.4 Applications médicales . . . . .	6
1.5.5 Applications écologiques . . . . .	6
1.5.6 Applications de traçabilité et de localisation . . . . .	6
1.5.7 Applications commerciales . . . . .	6

1.6	Facteurs et contraintes des RCSFs . . . . .	6
1.6.1	Durée de vie du réseau . . . . .	7
1.6.2	Ressources limitées . . . . .	7
1.6.3	Bande passante limitée . . . . .	7
1.6.4	Facteur d'échelle . . . . .	7
1.6.5	Topologie dynamique . . . . .	7
1.6.6	Agrégation de donnée . . . . .	8
1.7	Architecture protocolaire . . . . .	8
1.8	Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie . . . . .	9
1.8.1	État du module radio . . . . .	9
1.8.2	Accès au médium de transmission . . . . .	10
1.8.3	Modèle de propagation radio . . . . .	11
1.8.4	Routage des données . . . . .	12
1.9	Conclusion . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)</b>	<b>13</b>
2.1	Introduction . . . . .	13
2.2	Le routage dans les réseaux de capteurs . . . . .	13
2.3	Facteurs de conception des protocoles de routage . . . . .	14
2.3.1	Tolérance aux pannes . . . . .	14
2.3.2	Consommation d'énergie . . . . .	14
2.3.3	Limitations de capacités des nœuds . . . . .	14
2.3.4	Scalabilité . . . . .	14
2.3.5	Hétérogénéité . . . . .	15
2.3.6	Modèles de transmission de données . . . . .	15
2.4	Les principaux protocoles de routage dans les RCSFs . . . . .	16
2.4.1	Protocoles de routage pour les RCSFs selon la structure du réseau . . . . .	16
2.4.2	Protocoles de routage pour les RCSFs selon le type de protocole	18
2.5	Conclusion . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Étude de trois protocoles de clusterisation</b>	<b>20</b>
3.1	Introduction . . . . .	20
3.2	Le principe de clustering . . . . .	20
3.3	Intérêts et coûts de la clusterisation . . . . .	21
3.4	Contraintes de clustering . . . . .	21

3.5	Quelques protocoles de routage hiérarchiques . . . . .	21
3.5.1	LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hiérarchie . . . . .	22
3.5.2	Le protocole DT-LEACH (LEACH with Distance-based Threshold) . . . . .	24
3.5.3	DECSA (Distance - Energy Cluster Structure Algorithm) . . . . .	25
3.6	Tableau comparatif entre LEACH et DT-LEACH et DECSA . . . . .	27
3.7	Conclusion . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Proposition et simulation</b>	<b>29</b>
4.1	Introduction . . . . .	29
4.2	Hypotheses . . . . .	29
4.3	Le protocole proposé Hybride LEACH-DT et DECSA . . . . .	30
4.3.1	La phase d'initialisation . . . . .	30
4.3.2	La phase d'élection des CHs final(CHs-f) . . . . .	32
4.3.3	La phase de communication . . . . .	34
4.4	Simulation et analyse des performances . . . . .	35
4.4.1	Choix de l'environnement MATLAB . . . . .	35
4.4.2	Modele de consommation d'énergie . . . . .	35
4.4.3	Évaluation de performances . . . . .	36
4.5	conclusion . . . . .	42
	<b>Conclusion générale</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>45</b>

# Table des figures

1.1	La pile protocolaire dans un réseau de capteurs [1]. . . . .	8
4.1	L'organigramme de la phase d'initialisation. . . . .	31
4.2	L'organigramme de la phase d'élection des CHs-f. . . . .	33
4.3	Les nœuds morts . . . . .	38

# Liste des tableaux

- 3.1 Tableau comparatif. . . . . 27
- 3.2 Tableau comparatif (suite TAB 4.1). . . . . 28
  
- 4.1 Paramètres de simulation. . . . . 37
- 4.2 Le pourcentage de validation. . . . . 38
- 4.3 Résultats de simulation. . . . . 40
- 4.4 Résultats de simulation(suite). . . . . 41
- 4.5 La moyenne des résultats de simulation. . . . . 41

## Liste des abréviations

<b>WSN</b>	<b>W</b> ireless <b>S</b> ensor <b>N</b> etwork
<b>RCSF</b>	<b>R</b> éseau <b>D</b> e <b>C</b> apteurs <b>S</b> ans <b>F</b> il
<b>ADC</b>	<b>A</b> nalog <b>D</b> igital <b>C</b> onverter
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
<b>MAC</b>	<b>M</b> edium <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
<b>OLSR</b>	<b>O</b> ptimized <b>L</b> ink <b>S</b> tate <b>R</b> outing
<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality of <b>S</b> ervice
<b>PDR</b>	<b>P</b> aquet <b>D</b> elivery <b>R</b> atio
<b>NO</b>	<b>N</b> œud <b>O</b> rdinaires
<b>CH</b>	<b>C</b> luster <b>H</b> ead
<b>SB</b>	<b>S</b> tation <b>D</b> E <b>B</b> ase
<b>LEACH</b>	<b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptive <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>CSMA</b>	<b>C</b> arrier <b>S</b> ense <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>TDMA</b>	<b>T</b> ime <b>S</b> ensitive <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>DT-LEACH</b>	<b>D</b> istance based <b>T</b> hreshold <b>H</b> ierarchy for <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptive <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>DECSA</b>	<b>D</b> istance- <b>E</b> nergy <b>C</b> luster <b>S</b> tructure <b>A</b> lgorithme

# Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) représentent une technologie émergente qui vise à offrir des capacités innovantes. Leur utilisation ne devrait cesser à augmenter et ceci dans de nombreux domaines qu'ils soient militaires, scientifiques, ou encore logistiques. En revanche ces réseaux ont fait naître de nombreuses problématiques de recherche, la majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent principalement sur les moyens de réduire au minimum l'énergie consommée dans la communication de données de sorte à maximiser la durée de vie du réseau. La consommation énergétique est donc la contrainte clef dans les réseaux de capteurs, puisque elle influe directement sur la durée de vie des capteurs.

Dans ce travail nous nous intéressons à la couche réseau, où beaucoup de protocoles de routage ont été proposés pour conserver au maximum l'énergie du réseau. L'objectif de notre travail est de proposer un nouveau protocole de routage hiérarchique qui vise à minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, dans le but de garantir la transmission de données vers leur destinataire final ainsi prolonger la durée de vie du réseau.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre constitue une introduction au domaine très vaste des réseaux de capteurs sans fil : leurs architectures, leurs domaines d'applications, les facteurs et contraintes de conception d'un tel réseau, la pile protocolaire, ainsi que les facteurs intervenants dans la consommation d'énergie dans les RCSFs.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les facteurs de conception de protocoles de routage et les principaux protocoles de routages dans les RCSFs.

Le troisième chapitre définit la notion de Clustering dans les RCSFs, l'intérêt et les Contraintes de clustering. Enfin, la présentation de trois protocoles de routage hiérarchiques (LEACH,DT-LEACH,DECSA) et leurs avantages et inconvénients.

Dans la première partie du quatrième chapitre, nous donnons une description du protocole que nous avons proposé. La deuxième partie est consacrée à l'évaluation de performance de l'approche que nous avons proposée à travers l'analyse des résultats simulés avec MATLAB.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les points qui ont été abordés ainsi que des perspectives de recherches dans le domaine en question.

# Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

## 1.1 Introduction

De nos jours, la technologie des réseaux mobiles revêt une importance primordiale au sein de la société et de ce fait, doit être considéré comme un secteur stratégique contribuant dans une large mesure au développement économique et social.

Récemment, grâce aux progrès dans la technologie des communications sans fil, des capteurs multifonctionnels à base puissance avec un coût très bas ont été développés. Ces derniers ont une taille très petite et peuvent communiquer entre eux sur de courtes distances, d'où l'apparition des réseaux de capteurs sans fil WSNs (Wireless Sensor Networks).

Dans ce chapitre, nous allons introduire et faire une description des réseaux de capteurs sans fil, en présentant leurs différents composants, leurs architectures, ainsi que leurs domaines d'applications, par la suite, nous définissons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, nous présentons la pile protocolaire ainsi que la consommation d'énergie dans les RCSFs. Nous discuterons même les principaux facteurs intervenants dans la consommation d'énergie.

## 1.2 Qu'est-ce qu'un capteur sans fil

Un capteur est un appareil de taille très réduite avec des ressources énergétique non rechargeable, opérant de façon indépendante, capable de réaliser des mesures

sur l'environnement. Par exemple la mesure de la température, la pression de la lumière, le son et de les transformer en données numériques vers une ou plusieurs stations de collecte appelées nœuds puits ou station de base [1].

## 1.3 Architecture d'un nœud capteur

Un capteur est composé de quatre unités de base[1] :

### 1.3.1 Unité d'acquisition

Elle est composée d'un capteur qui permet de relier le nœud avec son environnement extérieur et d'un convertisseur analogique-numérique appelé ADCs (Analog Digital Converter). Ce dernier transforme les signaux analogiques fournis par le capteur en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [1].

### 1.3.2 Unité de traitement

Elle est composée d'un processeur et d'une unité de stockage. Cette unité commande les autres unités. Elle acquiert les informations de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication [2],[3].

### 1.3.3 Unité de communication(Transceiver)

Elle est responsable d'accomplir toutes les émissions et réceptions de données entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio [1].

### 1.3.4 Unité d'énergie

Un capteur est composé d'une unité d'énergie appelée batterie. Cette dernière a des capacités énergétiques limitées, ni rechargeable ni remplaçable. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus importante lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil, car elle influe directement sur la durée de vie des capteurs.

En fonction des besoins de l'application du réseau de capteurs, le nœud capteur peut intégrer d'autres unités tels que [4] :

- **Système de localisation** : il permet de déterminer la position du nœud.
- **Mobilisateur** : il permet le changement de la position du nœud.

## 1.4 Architecture d'un RCSF

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil est une architecture d'infrastructure sans fil à multi-sauts. La station de base appelée aussi nœud puits peut être fixe ou mobile. Elle joue le rôle d'un relai (intermédiaire) entre un nœud capteur et l'utilisateur [5],[6].

## 1.5 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans de nombreux domaines d'application. Dans [7], les auteurs classifient les applications en sept familles. Ces différents domaines sont exposés ci-dessous :

### 1.5.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs permettent la surveillance de toutes les activités des ennemies, c'est-à-dire tous ce qui concerne leurs emplacements, leurs nombres, leurs mouvements dans un champ de bataille. Les RCSFs sont aussi utilisé dans le but de protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes [8].

### 1.5.2 Applications liées à la sécurité

Les réseaux de capteurs sans fil touchent le domaine de la sécurité. Grace à la surveillance de voies ferrées, pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains peut être une application intéressante des réseaux de capteurs. Et aussi les RCSFs sont utilisé pour la protection des barrages, la détection prompte de fuites d'eau [8][9].

### 1.5.3 Applications environnementales

Les RCSFs sont utilisés dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir aux changements climatiques, la détection de feux de forêt, ou pour l'exploration et la surveillance dans les environnements hostiles comme les volcans et les régions toxiques[10].

### 1.5.4 Applications médicales

Les réseaux de capteurs sans fil ont été intégrés dans le domaine de la médecine, pour assurer une surveillance permanente des malades comme la température du corps, la tension artérielle, la quantité de sucre dans le corps, la surveiller le rythme cardiaque. Toutes ces données sont transmises à un ordinateur et évaluées par un médecin pour la surveillance du patient [11].

### 1.5.5 Applications écologiques

Le contrôle de système de climatisation et de chauffage des immeubles par les réseaux de capteurs sans fil. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenchés qu'aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire [8].

### 1.5.6 Applications de traçabilité et de localisation

Les réseaux de capteurs sans fil ont un impact sur la vie courante. Par exemple la localisation des victimes en les équipant par des capteurs. Le positionnement des gens s'effectue pour les gens qui se trouvent dans des zones à risque. Contrairement aux solutions de traçabilité et de localisation basées sur le système de GPS (Global Positioning System)[8].

### 1.5.7 Applications commerciales

Le réseau de capteur 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. 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[10].

## 1.6 Facteurs et contraintes des RCSFs

La conception d'un réseau de capteur sans fil engendre beaucoup de contraintes [12] :

### 1.6.1 Durée de vie du réseau

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

### 1.6.2 Ressources limitées

La capacité de traitement et la mémoire de stockage dans les réseaux de capteurs sans fil sont limitées, ce qui influence sur la durée de vie du réseau.

### 1.6.3 Bande passante limitée

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

### 1.6.4 Facteur d'échelle

Dans les réseaux de capteurs sans fil le déploiement des nœuds est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs. Ce nombre de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [1].

### 1.6.5 Topologie dynamique

Les caractéristiques de déploiement aléatoire et le fonctionnement autonome et la fréquence élevée de pannes rendent la maintenance de la topologie d'un RCSF une tâche complexe. Les raisons qui influencent sur le changement de la topologie des RCSFs sont :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.

- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

### 1.6.6 Agrégation de donnée

Les informations collectés par les nœuds de capteurs peut provoquer la perte d'espace et de temps, d'où le résultat de la réception d'informations redondantes pour la station de base. L'utilisation de la méthode d'agrégation de donnée permet d'éviter la répétition des informations, d'où l'amélioration de la durée de vie du réseau.

## 1.7 Architecture protocolaire

Selon Akyildiz , Su , Sankarasubramaniam et Cayirci[1]. Le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil est composé de cinq couches : application, transport, réseau, liaison de données, physique et aussi d'autres couches supplémentaires sont rajoutés pour gérer l'énergie, la mobilité et l'ordonnancement des tâches (Figure 1.1) peuvent être résumés comme suit[1] :

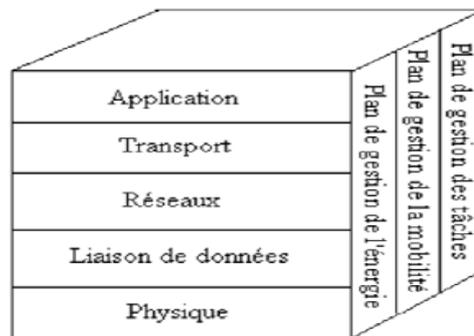


FIG. 1.1 – La pile protocolaire dans un réseau de capteurs [1].

- **Couche application**

Des différentes applications peuvent être utilisées sur cette couche selon la fonctionnalité des capteurs .

- **Couche transport**

Elle gère le flux de données .

- **Couche réseau**

Elle s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.

- **Couche liaison de données**

Elle gère le contrôle d'erreurs, l'accès sur le media.

- **Couche physique**

Elle assure les techniques d'émission, de réception et de modulation des données[18].

- **Plan de gestion d'énergie**

Il contrôle l'énergie des noeuds capteurs, c'est-à-dire la source énergétique des capteurs appelé batterie.

- **Plan de gestion de mobilité**

Il gère les mouvements des noeuds de capteurs, dans le but de maintenir des informations sur leurs localisations .

- **Plan de gestion des tâches**

Il ordonnance et distribue les différentes tâches de captage de données .

## 1.8 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous :

### 1.8.1 État du module radio

Pour assurer la communication entre les éléments du réseau, les capteurs utilisent leurs modules radio. Ce module est le composant qui consomme le plus d'énergie. On distingue quatre états des composants radio : actif, réception, transmission et sommeil [14].

- **État sommeil** : la radio est mise hors tension.
- **État transmission** : la radio transmet un paquet.
- **État actif** : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée.

- **État réception** : la radio reçoit un paquet.

Une observation importante, dans le cas de la plupart des radios, est que le mode actif induit une consommation d'énergie significative, presque égale à la consommation en mode réception [4]. Ainsi, il est plus judicieux d'étendre complètement la radio plutôt que de passer en mode actif quand on a ni à émettre ni à recevoir des données. Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil engendre une dissipation d'énergie importante due à l'activité des circuits électroniques [15]. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC (Medium Access Control).

## 1.8.2 Accès au médium de transmission

La surconsommation d'énergie concerne toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud. La surconsommation concerne la partie communication est sujette à plusieurs phénomènes. Ces derniers surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et ont été recensés dans [16], [17], [3] :

### 1.8.2.1 La retransmission

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Ce mode de communication est caractérisé par sa non fiabilité : si plusieurs capteurs émettent de façon simultanée il y a un risque de collision et aucun paquet ne pourra être reçu correctement. Afin d'assurer une transmission robuste, un nœud capteur ayant détecté une collision doit retransmettre son paquet de données.

### 1.8.2.2 L'écoute active (idle listening)

Un nœud ne sait pas quand il sera le destinataire d'un message envoyé par l'un de ses voisins, pour cela il doit tenir sa radio en mode de réception tout le temps. Ceci est connu sous le phénomène de l'écoute active du canal. Pour cette raison, une énergie supplémentaire est perdue. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

### 1.8.2.3 La surcharge(overhead)

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle.

### 1.8.2.4 La surécoute (overhearing)

Selon Ilyas et Mahgoub [4]. Les données transmises par un nœud capteur peuvent atteindre d'autres nœuds qui se trouvent dans sa portée de transmission. La surécoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.

### 1.8.2.5 La surémission (overemitting)

Le phénomène de surémission se produit quand un nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle.

### 1.8.2.6 La taille des paquets

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop petite. Si la taille est petite, le nombre de paquets de contrôle(acquittements) généré augmente l'overhead. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour transmettre ces paquets de grande taille.

## 1.8.3 Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de  $1/d^n$ , où  $d$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur,  $n$  est un exposant de perte d'un chemin (Exemple :  $n=2$  dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [19].

### 1.8.4 Routage des données

Le routage dans les réseaux de capteurs est un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

## 1.9 Conclusion

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

Le chapitre suivant est consacré à l'étude détaillée du routage de données dans les RCSFs, qui est considéré comme le domaine le plus exploré parmi les domaines de recherche sur les réseaux de capteurs. Il représente aussi un problème complexe car nous devons assurer la fiabilité de livraison de données, la performance du système et tout cela en consommant moins d'énergie.

# Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

## 2.1 Introduction

Le routage consiste à trouver un chemin pour envoyer le message de la source à la destination. Dans le cadre des réseaux de capteurs, le routage doit être efficace en énergie. Pour cela, il faut bien sûr être capable de trouver une route qui ne coûte pas trop d'énergie, une route pas trop longue. Mais il faut aussi être capable de trouver ou de maintenir les routes sans dépenser trop d'énergie.

Les protocoles de routage au sein des RCSFs sont influencés par un facteur déterminant à savoir : la minimisation de la consommation d'énergie sans une perte considérable de l'efficacité. Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud joue le rôle de source et de relais. De ce fait, la défaillance énergétique d'un capteur peut changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante, en premier lieu, nous présenterons les facteurs de conception de protocoles de routage, ainsi que leurs classification dans les RCSFs suivant différentes approches .

## 2.2 Le routage dans les réseaux de capteurs

Le routage est le mécanisme par lequel des chemins sont sélectionnés dans un réseau pour acheminer les données d'un point à un autre avec le minimum de pertes

et de dissipation d'énergie. Les protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs peuvent être classés en deux grandes familles : le routage plat et le routage hiérarchique [20].

## **2.3 Facteurs de conception des protocoles de routage**

Les facteurs et contraintes nécessaires lors de la conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont nombreux, nous allons les mentionnés comme suit :

### **2.3.1 Tolérance aux pannes**

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'aptitude du protocole de routage à maintenir ses fonctionnalités, en cas de panne de quelques nœuds, le réseau devrait pouvoir détecter l'échec et s'organiser, se reconfigurer et récupérer des échecs de nœud sans desserrer aucune information [21].

### **2.3.2 Consommation d'énergie**

La source d'énergie est l'un des composants les plus importants d'un nœud capteur lors de la détection et de la transmission des données captées sur le réseau [22]. Pour préserver de l'énergie et augmenter la durée de vie d'un réseau, les capteurs peuvent être mis en veille lorsqu'ils sont inactifs. Un bon nombre de recherches courantes se concentrent sur la conception de protocoles et d'algorithmes power-aware (consommation d'énergie minimale) pour les réseaux de capteurs sans fil [23].

### **2.3.3 Limitations de capacités des nœuds**

Les nœuds capteurs ont une capacité de traitement, de mémoire et bande passante limitée. Cela signifie que le protocole de routage doit être simple et peu exigeant en capacité de calcul et de stockage.

### **2.3.4 Scalabilité**

Un RCSF peut contenir un très grand nombre de nœuds capteurs. Les protocoles de routage doivent donc être très scalables. Autrement dit, les protocoles de routage

ne devraient pas souffrir d'une dégradation de performances dans le cas d'endommagement de nœuds aussi bien qu'avec un nombre plus élevé de nœuds [24].

### 2.3.5 Hétérogénéité

Les nœuds d'un RCSF sont identique en termes des capacités de calcul, de mémoire de stockage, et des unités d'énergie qui sont limité et non rechargeable. Ce qui démunie la durée de vie du réseau. Cependant, la solution envisagé par certaines applications consiste à intégrer des nœuds spéciaux (hétérogènes) plus puissants que les autres et qui seront chargés d'effectuer les tâches les plus coûteuses en termes de ressources énergétiques [25].

### 2.3.6 Modèles de transmission de données

Les RCSFs se caractérisent par une communication particulière par rapport aux autres réseaux, où les données transitent souvent, entre des capteurs qui scrutent l'environnement qui les entourent et envoient l'information vers un ou plusieurs nœuds dits puits(sink ou SB). Selon l'application implémentée au niveau du puits, nous distinguons trois types de communications principales [23] :

1. **Continue :**

Dans ce modèle, les nœuds capteurs envoient les informations d'une manière continue au nœud " sink " suivant un volume de trafic prédéterminé.

2. **Dirigée par un événement (event-driven) :**

Au lieu d'avoir un nœud émetteur et un autre récepteur de l'information, on trouve un nœud récepteur (le nœud de contrôle " sink ") et un groupe de nœuds capteurs, se trouvant proche de l'événement, qui sont tous des émetteurs de la même information.

3. **Dirigée par l'application (application-driven) :**

La transmission de données est initiée par la réception de la requête envoyée par le puits qui définit le type et les fréquences des envois. Dans ce cas, des mécanismes de correspondance sont nécessaires pour que les capteurs réussissent à déchiffrer les requêtes reçues (exemple : les applications du contrôle des systèmes automatisés).

## 2.4 Les principaux protocoles de routage dans les RCSFs

Selon Ali et Ravula [26]. Les principaux protocoles de routage sont résumés comme suit :

### 2.4.1 Protocoles de routage pour les RCSFs selon la structure du réseau

#### 2.4.1.1 Les protocoles de routage plat (flat based-routing)

Dans ce type de protocole, tous les nœuds ont le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage, c'est-à-dire l'acheminement de l'information au nœud centralisé SB [27]. La tâche de routage est de deux formes [28] :

-La communication directe des capteurs avec la station de base. Dans ce cas, tous les nœuds peuvent envoyer leurs données à la station de base en utilisant une forte puissance, ceci peut conduire à la diminution de la durée de vie du réseau [29].

-La communication indirecte via un mode multi-sauts.

#### **Avantages**

- 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.
- Le routage à plat est très simple dans son fonctionnement et les protocoles à plat ne nécessitent pas beaucoup de communications pour établir les routes [30].

#### **Inconvénients**

- Le routage à plat exige que tous les nœuds opèrent de la même façon et d'une manière distribué.
- Un phénomène est connu sous le nom de points chauds(Hot-Spot), ce phénomène est dû à l'augmentation de la participation des nœuds proches de la station de base, et donc vont épuiser leur énergie beaucoup plus rapidement que les autres nœuds capteurs [20],[43].

### 2.4.1.2 Les protocoles de routage hiérarchique

Après avoir vu les inconvénients de la topologie plate, l'approche hiérarchique a été proposée dans le but de prolonger la durée de vie du réseau. Selon Dhoutaut [31]. Cette architecture du réseau est composée de plusieurs clusters, dans le but de faciliter le routage des données et la gestion du réseau. Dans chaque cluster, on trouve un nœud leader (cluster-head) et des nœuds simples appelé aussi nœuds ordinaire.

Dans ce type de protocole, les passerelles supportent la majeure partie de la charge du routage (les mobiles qui s'y rattachent savent que si le destinataire n'est pas dans leur voisinage direct, il suffit d'envoyer à la passerelle qui se débrouillera) [31]. Un exemple de protocole utilisant cette stratégie est l' OLSR (Optimized Link State Routing).

#### **Avantage**

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

#### **Inconvénients**

- L'exigence d'une ressource énergétique plus élevé pour les cluster-heads par rapport aux autre nœuds du réseau.
- L'augmentation des nombre des cluster-heads est dû à l'augmentation de la taille du réseau et par conséquent, le nombre des messages overhead augmente lors de l'établissement de ces cluster-heads[13].

### 2.4.1.3 Les protocoles de routage avec localisation géographique

Dans ce type de protocole, les méthodes de localisations sont employées en supposant que chaque capteur a la connaissance exacte de sa position. Ils nécessitent des composants spéciaux comme le GPS ou des algorithmes de localisation pour détecter le positionnement des nœuds[32].

#### **Avantages**

- L'utilisation des GPSs permet d'améliorer la connaissance de la position aux centimètres près. Des traitements du signal dans des récepteurs plus sophistiqués permettent d'améliorer la précision de positionnement (résolution de la distance).

- L'espace de stockage nécessaire pendant le routage est très réduit car il ne nécessite aucune table de routage.

**Inconvénients**

- Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- Le routage basé sur la localisation géographique n'est pas un bon choix pour les applications qui exigent une livraison fiable à des intervalles réguliers des paquets de données[20],[42].

## 2.4.2 Protocoles de routage pour les RCSFs selon le type de protocole

### 2.4.2.1 Les protocoles de routage multi-chemin

Le routage adopté par les protocoles de routage multi-chemin consiste à maintenir plusieurs chemins depuis chaque capteur vers le nœud puits, pour avoir des chemins de secours si jamais le chemin principal serait rompu[33].

### 2.4.2.2 Les protocoles de routage basé sur la négociation des données

Ces protocoles de routage ont traité le problème de la redondance des données. Avant de transmettre, les nœuds négocient entre eux les données en utilisant des messages de négociation, le résultat de cette procédure est la transmission des informations utiles ce qui prolonge la durée de vie du réseau [34].

### 2.4.2.3 Les protocoles de routage basé sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud " Sink "[33].

### 2.4.2.4 Les protocoles de routage basé sur la QoS

Ce type de protocoles tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous citons : le délai d'acheminement de bout en bout, la gigue, PDR (Paquet Delivery Ratio), énergie consommée, afin de réaliser un routage équilibré en termes de consommation d'énergie et la qualité de données [33].

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le routage dans les RCSFs, les facteurs qui influent sur la conception des protocoles de routage ont été présentés, ainsi que les principales classifications des protocoles de routage.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons plus aux protocoles de routage hiérarchique, déployés dans les réseaux de capteurs sans fil existant dans la littérature et qui ont comme objectif commun le prolongement de la durée de vie du réseau.

# Étude de trois protocoles de clusterisation

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous commencerons par donner le principe de clustering, son intérêt et ses contraintes. De plus, nous présenterons trois protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs (LEACH, DT-LEACH, DECSA), afin de voir leurs comportements dans certaines applications.

## 3.2 Le principe de clustering

Le clustering ou la hiérarchisation est un mécanisme qui consiste à regrouper les nœuds en groupes dits clusters. Un cluster est un ensemble de nœuds qui forme l'unité d'organisation d'un réseau de capteurs. Chaque cluster est désigné par des nœuds ordinaires (sensor nodes) et d'un leader (cluster-head), ce dernier représente le chef du groupe surnommé aussi leader. L'élection des CHs pour chaque cluster se fait par regroupement statique ou par regroupement dynamique .

Le clustering est utilisé dans plusieurs applications des réseaux de capteurs sans fil, afin de réduire la charge de trafic sur les nœuds par le processus d'agrégation de données, dans le but de prolonger la durée vie du réseau.

Selon Butun, In-hoRa et Sankar [35]. Chaque cluster est un groupe de nœuds capteurs interconnectés avec un cluster-head (CH).

### 3.3 Intérêts et coûts de la clusterisation

Dans [36], la clusterisation est considéré comme un point clé dans la conception des réseaux de capteurs sans fil.

Les principaux avantages de la technique de clusterisation sont :

- La tâche d'un cluster-head ne consiste pas seulement à router les données, mais peut être complétée par une agrégation ou une fusion des données effectué par un cluster-head et par la suite envoyées vers le puits ce qui permet la réduction du nombre de paquets échangés [37][38].
- Réduire la taille des tables de routage stocké au niveau des noeuds en localisant le chemin, car la mise en place des routes se fait seulement au niveau des cluster-heads [39],[40].
- La technique de clustering facilite le partage de ressource et/ou la synchronisation au sein d'un cluster [41].

### 3.4 Contraintes de clustering

Dans cette partie, nous présentons quelques considérations indispensables pour la conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil. Un RCSF est composé des nœuds et des liens qui peuvent être représenté par un graphe non orienté  $G=(V,E)$ , où  $V$  représente les nœuds et  $E$  signifie les liens [43]. Dans ce contexte, les besoins suivants devront être répondu :

- L'approche de clustering peut être classé comme déterministe, adaptative et aléatoires.
- Après un nombre fixe d'itérations, la procédure de clustering se termine.
- La représentation d'un ensemble de clusters connexes appelée aussi graphe connexe est le résultat de l'approche de clustering.
- La procédure de clustering est complètement distribuée.

### 3.5 Quelques protocoles de routage hiérarchiques

Les protocoles de routage hiérarchiques minimisant la consommation d'énergie dans les RCSFs sont extrêmement nombreux et variés. Dans le paragraphe suivant nous allons, faire une étude un peu détaillée sur certains d'entre eux (LEACH, DT-LEACH, DECSA).

### 3.5.1 LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hiérarchie

Dans [13], Heinzelman et al ont proposé le protocole LEACH comme un nouveau protocole de routage efficace en consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs. L'idée consiste à former des groupes " clusters " de nœuds capteurs basés sur l'amplitude du signal reçu et utiliser les clusters-heads élus comme routeurs. Ces clusters-heads collectent les données à partir de tous les nœuds capteurs appartenant à leur cluster, agrègent les données rassemblées par des procédures de fusion. et transmettent ces données directement à la station de base. Les cluster-heads élus demeurent ainsi pour une période de temps appelée " round ". Au début de chaque round, chaque nœud détermine la possibilité d'être un clusters-head pendant la période en cour s'il décide de l'être, il annonce sa décision à tous ses nœuds voisins. Les autres nœuds, qui décident de ne pas être clusters-heads adéquat se base sur plusieurs paramètres prédéterminés tel que le rapport signal/bruit.

L'algorithme de LEACH se déroule en 2 phases : une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission.

#### 3.5.1.1 La phase d'initialisation(Set-up)

Chaque nœud choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1, si ce nombre est inférieur à un seuil  $T_{i,r}$  alors le nœud devient un CH pour le cycle actuel, c'est-à-dire chaque nœud décide de devenir ou pas un CH pour le tour courant. Le CH élu envoie un message de diffusion aux nœuds capteurs ordinaires dans le réseau, dans le but de les informer de son élection comme CH.

Après avoir reçu le message d'annonce par les CHs, les nœuds ordinaires décident du cluster auquel ils veulent appartenir. Ce choix est basé sur la force du signal du message reçu, les nœuds ordinaires envoient des messages aux CHs pour les informer qu'ils seront membres de leurs clusters. Ensuite, les CHs diffusent des slots de TDMA durant lequel les nœuds ordinaires peuvent envoyer et transmettre leurs données .

Le seuil  $T_{i,r}$  est défini comme suit :

$$T_{i,r} = \begin{cases} P/1-P(r \bmod [1/P]), & \text{si } i \in G(r) \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.1)$$

$P$  : est la probabilité qu'un nœud  $i$  devient un CH.

$r$  : numéro du rond courant.

$G(r)$  : ensemble des nœuds n'ayant pas été élus comme CH durant les  $1/P$ .

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu comme cluster-head émet un message d'annonce à tous ces voisins, ce message d'annonce est constitué d'un identifiant du nœud (ID) et d'un entête distinguable .

Afin d'éviter les collisions de message, le protocole CSMA (Carrier Sense Multiple Access) est utilisé par les clusters-heads, ensuite les nœuds capteurs qui reçoivent le message d'annonce décident leur appartenance à un cluster et le nœud capteur choisi le CH le plus proche de lui. En cas d'égalité un chef aléatoire est choisi.

### 3.5.1.2 La phase de transmission (steady phase)

Les nœuds de capteurs envoient leurs données pendant l'intervalle de temps alloué au nœud en utilisant le protocole d'ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access), ensuite le cluster-head effectue l'agrégation des données dans le but minimiser la consommation d'énergie. Enfin, les CHs communiquent avec la station de base pour envoyer les données des nœuds de capteurs .

Selon Heinzelman ,Chandrakasan et Balakrishnan [44]. Le protocole LEACH est exécuté en deux phases :la phase "Set-up" et la phase "steady-state" , où la durée de la deuxième phase est plus longue que celle de la première phase.

- **Avantages**

- Le nœud qui est sélectionné comme CH durant un tour ne sera pas choisi comme CH dans le prochain tour, donc LEACH distribue la consommation d'énergie entre les nœuds du réseau.
- LEACH permet d'éviter la transmission directe des données qui consomme beaucoup d'énergie, d'où l'utilisation des CHs.

- **Inconvénients**

- Une grande consommation de l'énergie lors de l'envoi directe des données à partir des CHs vers la SB sans nœud intermédiaire.
- En raison de l'approche probabiliste de la sélection des CHs, le choix d'un nœud qui a été un CH durant le tour précédent comme un nouveau CH pour le tour actuel peut causer la mort de ce nœud [13] .

### 3.5.2 Le protocole DT-LEACH (LEACH with Distance-based Threshold)

Ce protocole [45] est une amélioration de LEACH, il est basé sur la distance et l'énergie résiduel, il vise à équilibrer la consommation d'énergie entre tous les nœuds du réseau.

Dans LEACH-DT, les nœuds sont sélectionnés pour devenir des CHs avec des probabilités différentes en fonction de leurs distances à la station de base. Le protocole DT-LEACH utilise la même formule que le LEACH d'origine, voir l'équation (3.1).

Dans DT-LEACH le seuil est calculée comme suit :

$$T_{i,r} = \frac{P_i}{1 - P_i(\text{rmod}[1/P_i])}, \quad 0 \leq P_i \leq 1. \quad (3.2)$$

Cependant, contrairement à LEACH,  $P_i$  n'est pas un paramètre constant pour tous les nœuds. D'autre part, plus la distance qui sépare un nœud avec la SB n'est petite, plus la probabilité que ce nœud devient CH augmente.  $P_i$  est calculé comme suit :

$$P_i = \frac{E_{ch}d(j) - E_{non-ch}}{E_{ch}d(i) - E_{non-ch}} \quad (3.3)$$

Où  $P_i$  est la probabilité qu'un nœud  $i$  devient un CH et  $d(i)$  est la distance du nœud  $i$  à la SB,  $E_{ch}$  est l'énergie résiduelle moyenne des CHs et  $E_{non-ch}$  est l'énergie résiduelle moyenne des nœuds non-CH.

L'énergie des noeuds clusters-heads est calculée comme suit :

$$E_{ch}(d) = E_0 + E_T(hl_{data}, d) \quad (3.4)$$

L'énergie des noeuds non-ch est calculée comme suit :

$$E_{non-ch} = E_e(Kl_{adv} + h_{tdma} + hl_{data}) + E_T(hl_{join}, \sqrt{2M}) + \tau_2 E_L + hl_{data} \quad (3.5)$$

$$(E_e + C_f^4/2R^2 + c_m/3(b^4 - \sigma^6/b^2))$$

Dans DT-LEACH, les nœuds sont sélectionnés pour devenir des CHs avec des probabilités différentes en fonction de leurs distances à la station de base, et leurs énergie restante d'une manière, telle que la consommation d'énergie entre les nœuds sont équilibré. Ceci est en contradiction avec le protocole LEACH, où tous les nœuds sont sélectionnés pour devenir des CHs avec une probabilité constante prédéfinie.

- **Avantage**

- Le protocole DT-LEACH prend en considération la distance et l'énergie résiduelle des nœuds, dans le but d'assurer une répartition uniforme des clusters-heads lors de la sélection des clusters-heads, ce qui prolonge le durée de vie du réseau.

- **Inconvénient**

- Un nœud ordinaire (non cluster-head) transmet un signal de données  $l_{data}$  pour son cluster-head, ce message  $l_{data}$  est due à un caractère aléatoire  $r$ , ce qui peut pousser à une augmentation de la consommation de l'énergie.

### 3.5.3 DECSA (Distance - Energy Cluster Structure Algorithm)

Est un algorithme hiérarchique [46], il est basé sur la classification classique de l'algorithme de routage LEACH, il prend en compte à la fois la distance et l'énergie résiduelle des nœuds pour former des CHs.

#### 3.5.3.1 La phase d'initialisation

Dans cette phase, le processus de sélection du cluster-head consiste à suivre 2 étapes :

- Election du cluster head(CH).
- Election du station de base cluster head (BCH).

Tout d'abord, chaque nœud de capteur génère un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur au seuil prédéfini  $T_{i,r}$  de LEACH, ce nœud capteurs devient un faux-cluster-head. Ensuite, tous les nœuds du cluster compris le faux cluster-head vont calculer respectivement leurs  $K(i)$  et ils compare leurs  $K(i)$  avec le  $K(i)$  du faux-cluster-head du tour actuel . Si le  $K(i)$  d'un nœud de capteur est supérieur aux  $K(i)$  du faux cluster-head, le nœud de capteur devient un cluster-head, par contre dans le cas où le  $K(i)$  du faux cluster-head est supérieur aux  $K(i)$  des autres nœuds de capteurs, le faux cluster-head devient un CH.

Le  $K(i)$  est calculé comme suit :

$$K(i) = \frac{E_{ch}d(i)}{d(i)} \quad (3.6)$$

ou bien

$$K(i) = \frac{E_{non-ch}d(i)}{d(i)} \quad (3.7)$$

Où  $k(i)$  est le seuil des CHs élus,  $E_{ch}$  est l'énergie résiduelle du nœud CH,  $E_{non-ch}$  est l'énergie résiduelle du nœud ordinaire,  $d(i)$  est la distance entre le nœud  $i$  avec la SB.

Après l'élection du cluster-head, on utilise le seuil TBCH pour sélectionner les CHs qui deviendra le BCH. Ce dernier est sélectionné si la valeur de TBCH est maximale.

Nous définissons TBCH ( $i$ ) comme suit :

$$T_{BCH}(i) = \frac{E_{ch}d(i)}{E_0} + \frac{E_{non-ch}}{d(i)} \quad (3.8)$$

Où  $E_{ch}d(i)$  est l'énergie résiduelle actuelle du nœud cluster-head  $i$ ,  $E_0$  est l'énergie initiale du nœud dans le réseau,  $d(i)$  est la distance entre le nœud  $i$  avec la station de base.

### 3.5.3.2 La phase de travail (communication)

Dans la phase de travail stable, la station de base diffuse les messages à l'ensemble du réseau. Après la réception du message qui contient la valeur de TBCH, la station de base-cluster-head (c'est-à-dire le cluster-head qui communique avec la station de base) sélectionne le maximum TBCH comme prochain saut et le reste des sauts reste peut être choisi de la même manière jusqu'à ce que tous les CHs sont reliés en formant un trajet de communication complet.

Selon Yong et al [46]. La structure hiérarchique d'un modèle de réseau est constitué de trois niveaux de DECSA, qui divise les nœuds en quatre catégories : station de base (SB), la station de base cluster-head (BCH), les clusters-heads (CH) et les nœuds ordinaire (SN).

- **Avantages**

- Il améliore le processus de sélection de CH et le processus de formation du cluster.
- Il permet d'éviter la communication directe entre la station de base et le cluster-head.
- Il considère à la fois la distance et l'énergie résiduelle des nœuds pour l'élection des CHs, ce qui réduit la consommation d'énergie des CHs.

- **Inconvénients**

- Il sélectionne aléatoirement des nœuds CHs, ce qui peut produire des périodes perdus (l'épuisement de l'énergie des noeuds).

- L'utilisation de TBCH dans la phase de communication crée un inconvénient, qui est l'envoi en arrière (sens contraire de la SB) qui mène à l'épuisement rapide de l'énergie.

### 3.6 Tableau comparatif entre LEACH et DT-LEACH et DECSA

Protocoles	Formules	La formule utilisée	explication
LEACH	équation (3.1)	$P$	$P_{est}$ (fixe)et la probabilité qu'un noeud $i$ devient un CH .
DT-LEACH	équation(3.2)	$P_i$	équation(3.3)
DECSA	équation(3.6)ou équation (3.7)	l'énergie résiduel du noeud CH( $E_{ch}$ )et du noeud non-ch ( $E_{non-ch}$ ) en fonction de la distance	l'utilisation d'un coefficient de pondération au lieu de la probabilité donne des résultats uniforme et il depend seulement de la distance entre un noeud et la SB.

TAB. 3.1 – Tableau comparatif.

Protocoles	Avantage	Inconvénient	Références
LEACH	simple à utiliser	$P$ est une variable déterministe et la probabilité de tombé dans le même CH est forte.	[13]
DT-LEACH	10% d'amélioration par rapport à LEACH	$P_i$ est une variable pseudo-aléatoire et la probabilité de tombé dans le même CH est inférieure à celle de LEACH .	[45]
DECSA	31% d'amélioration par rapport à LEACH	l'épuisement de l'énergie des nœuds à cause de la sélection aléatoire des CHs et Le risque de tombé dans la même distance pour des différents nœuds .	[46]

TAB. 3.2 – Tableau comparatif (suite TAB 4.1).

### 3.7 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre trois protocoles de routage hiérarchique (LEACH, DT-LEACH, DECSA) dans les RCSFs. La hiérarchisation répond aux besoins d'un réseau étendu, notamment un réseau de capteurs. Ce qui nous a inspirés pour mettre en œuvre une proposition hybride (DT-LEACH ,DECSA ), que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

# Proposition et simulation

## 4.1 Introduction

Plusieurs travaux dans le domaine des réseaux de capteurs ont été publiés sur le routage selon l'approche de clustering, plusieurs défis en terme de gestion de la consommation d'énergie des nœuds de capteurs restent présents.

Afin d'implémenter notre protocole proposé, nous avons utilisé le code d'implémentation du protocole DT-LEACH et DECSA et effectué certaines modifications à plusieurs niveaux. Ces modifications consistent en combinant entre ces deux protocoles pour obtenir un résultat meilleur.

Dans ce chapitre, nous allons présenter aussi les résultats des simulations de notre protocole proposé Hybride DT-LEACH et DECSA. Les simulations effectuées sur MATLAB (MATrixLABoratory) permettent d'évaluer les performances de la solution et consolider nos affirmations.

## 4.2 Hypotheses

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

Les hypothèses de notre travail sont décrites comme suit :

- Les nœuds capteurs sont tous fixes et identiques.
- Tous les nœuds peuvent atteindre la station de base.
- La station de base est considérée comme une ressource non limitée ni épuisable.

- La mort de chaque capteur est causée par l'épuisement de son énergie.

### 4.3 Le protocole proposé Hybride LEACH-DT et DECSA

L'inconvénient majeur du protocole DECSA est la sélection aléatoire des clusters-heads, c'est-à-dire le choix d'un nœud qui a été déjà un CH durant le tour précédent comme un nouveau CH pour le tour actuel peut causer la mort de ce nœud (l'épuisement de son énergie), cette évènement est appelé aussi les périodes perdus. Pour cela, nous avons adopté DT-LEACH, où la sélection des CHs s'effectue selon des probabilités différentes en fonction de leurs énergies et leurs distances à la station de base.

Notre protocole se base essentiellement sur trois phases, la phase d'initialisation, la phase d'élection des CHs et la phase de communication.

#### 4.3.1 La phase d'initialisation

La phase d'initialisation commence par la création des clusters-Heads dans laquelle on adopte la même approche utilisé dans LEACH-DT, d'où chaque nœud décide de devenir ou ne pas devenir un CH pour le tour actuel, cela se fait par la génération d'un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre est inférieur à un seuil  $T_{i,r}$ , le nœud devient un CH pour le tour actuel, le seuil est fixé comme suit :

$$T_{i,r} = \begin{cases} \frac{P_i}{1 - P_i(r \bmod (1/P_i))}, & G_i(r) = 0 \\ 0, & G_i(r) = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Où  $P_i$ =la probabilité pour qu'un nœud devient un CH,  $r$ =le tour actuel,

$G$ = l'ensemble de nœuds qui ne sont pas des CHs dans le premier tour  $1/P$ .

$G_i(r)$  est la fonction de détermination si oui ou non le nœud  $i$  a été un CH dans le premier cycle, à savoir :

$G_i(r) = 1$  signifie que le nœud  $i$  a été un CH et  $G_i(r) = 0$  sinon.

Après la formation des CHs, ces derniers diffusent un message ADV, le message d'ADV est un message 2-tuple, (ID, Code), contient l'identifiant et le code du CH. Ensuite, chaque nœud non-CH choisit un CH le plus proche et il passe en mode veille, puis il se réveille à un moment aléatoire pour envoyer un message JOIN au CH le plus proche avec CSMA, par la suite il passe au mode sommeil à nouveau.

Après cette étape, les CHs diffusent simultanément des slots de TDMA aux nœuds ordinaires pour la transmission des données.

La figure suivante est un organigramme résumant la phase d'initialisation au niveau d'un nœud de capteur.

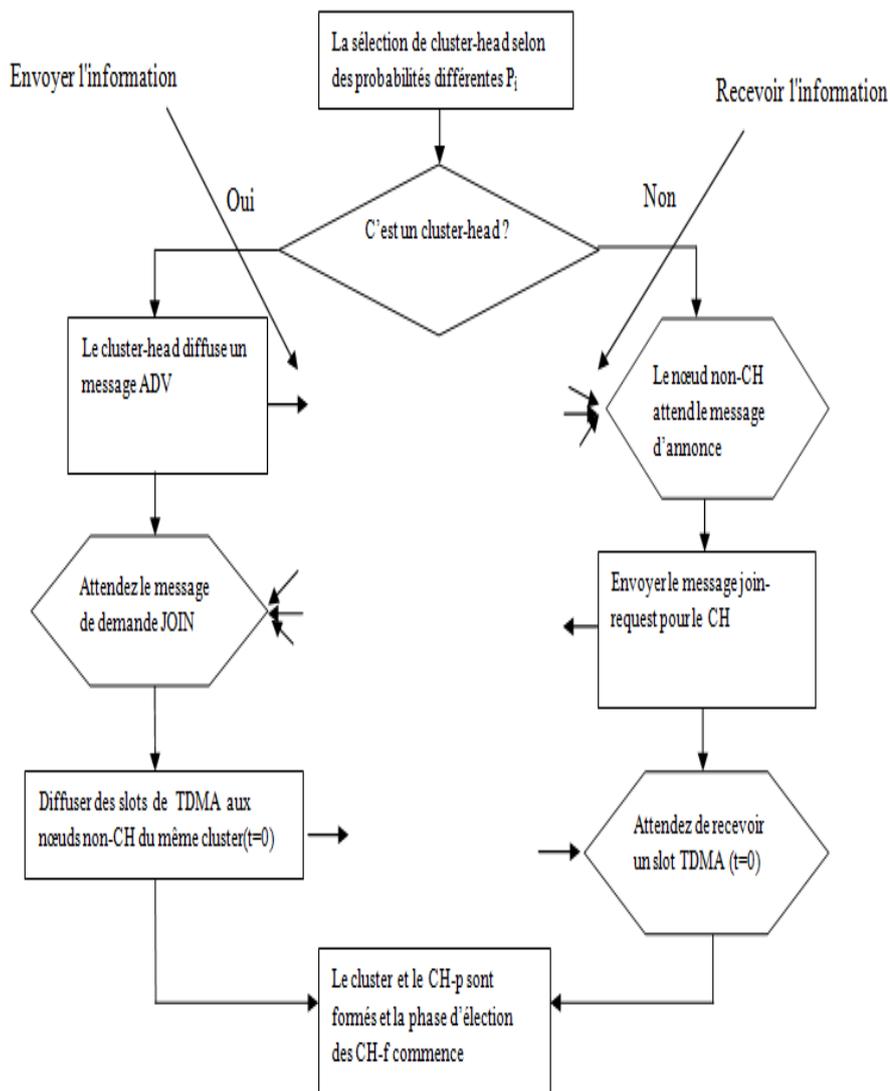


FIG. 4.1 – L'organigramme de la phase d'initialisation.

• **Avantages**

- La distance entre la station de base SB et les capteurs est utilisée pour équilibrer la consommation d'énergie et augmenter la durée de vie du réseau.
- DT-LEACH permet d'éviter la transmission directe des données qui consomme beaucoup d'énergie, d'où l'utilisation des CHs.

### 4.3.2 La phase d'élection des CHs final(CHs-f)

On considère les CHs choisis en 1<sup>er</sup> phase comme des CHs primaires(CHs-p).

La SB calcule la valeur de  $K(i)$  de tous les nœuds du cluster et compare ces valeurs avec les valeurs de  $K(i)$  des CHs choisis dans la phase d'initialisation dans ce tour. Si les valeurs de  $K(i)$  des nœuds du cluster sont supérieures à la valeur de  $K(i)$  du nœud CH primaire, le nœud qui possède le maximum de  $K(i)$  est sélectionné comme CH final, c'est à dire le capteur (nœud) qui possède une grande énergie résiduelle et plus proche à la station de base. Dans le cas où le  $K(i)$  du CH primaire est le maximum, le CH primaire sera sélectionné comme CH final.

RQ : le nœud qui a une énergie résiduelle élevée a plus de probabilité d'être élu comme CH final.

Le  $K(i)$  est calculé dans les 2 cas comme suit :

1<sup>er</sup> cas : un nœud  $i$  est un CH :

$$K(i) = \frac{E_{ch}d(i)}{d(i)} \quad (4.2)$$

2<sup>eme</sup> cas : un nœud  $i$  est un nœud ordinaire :

$$K(i) = \frac{E_{non-ch}}{d(i)} \quad (4.3)$$

Où  $K(i)$  est le seuil des CHs élus,  $E_{ch}$  est l'énergie résiduelle du nœud CH,  $E_{non-ch}$  est l'énergie résiduelle du nœud ordinaire,  $d(i)$  est la distance entre le nœud  $i$  avec la SB. Après l'élection du cluster-head, nous utilisons le seuil  $T_{BCH}$  (threshold base station cluster head) pour sélectionner CH qui deviendra le  $BCH$  (la station de base cluster-head) .

Le  $BCH$  sélectionné est celui qui a une valeur  $T_{BCH}(i)$  maximale.

Nous définissons  $T_{BCH}(i)$  comme suit :

$$T_{BCH}(i) = \frac{E_{ch}d(i)}{E_0} + \frac{E_{non-ch}}{d(i)} \quad (4.4)$$

Où  $E_{ch}d(i)$  est l'énergie résiduelle actuelle du nœud cluster-head  $i$ ,  $E_0$  est l'énergie initiale du nœud dans le réseau,  $d(i)$  est la distance entre le nœud  $i$  avec la station de base. La station de base diffuse le message à l'ensemble du réseau. Après la réception des messages, selon la valeur différente de  $T_{BCH}(i)$ , le  $BCH$  sélectionne le maximum  $T_{BCH}$  comme son prochain saut, et le reste des sauts reste vont être choisis de la même manière jusqu'à ce que tous les CHs sont reliés en formant un trajet de

communication complet. Afin de réduire la distance entre la SB et le CH qui est loin de la SB.

L'organigramme suivant présente le principe de cette phase :

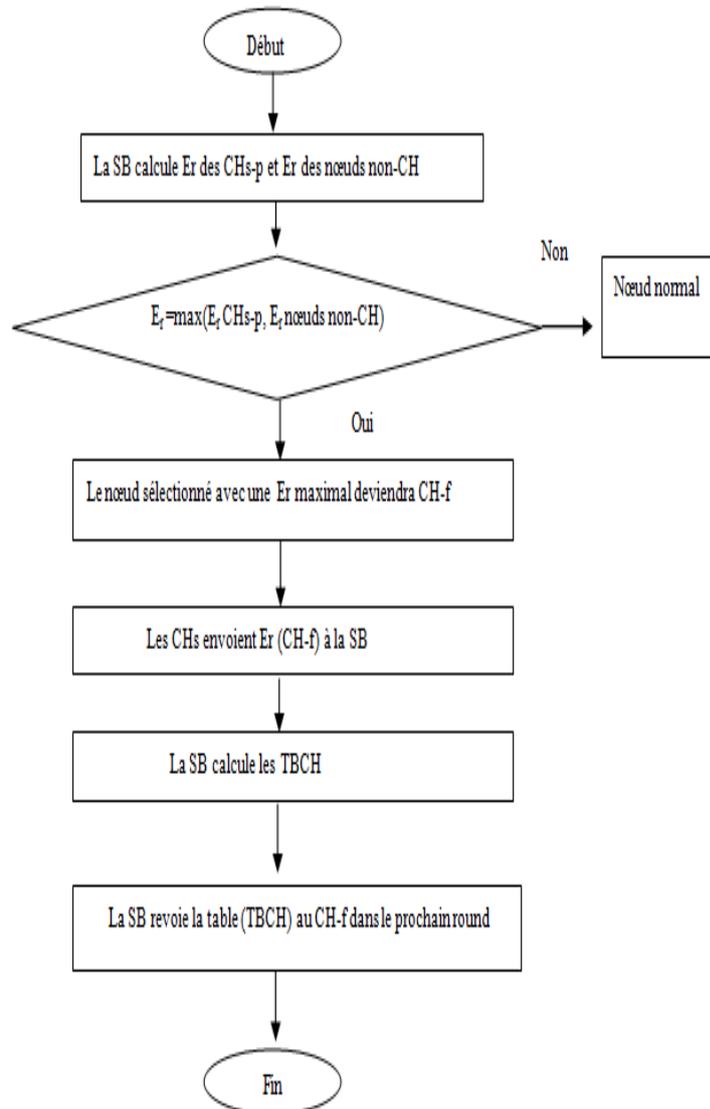


FIG. 4.2 – L'organigramme de la phase d'élection des CHs-f.

- **Avantages**

- La sélection des CHs se fait en terme d'énergie résiduelle et la distance, donc nous avons éliminé la sélection aléatoire des clusters-heads.
- DECSA permet d'éviter la communication directe entre la station de base et la tête de cluster.

### 4.3.3 La phase de communication

Dans cette étape la SB diffuse les messages dans le réseau. Lors de la réception du message accordé avec la valeur de  $T_{BCH}(i)$ , le BCH sélectionne le maximum  $T_{BCH}$  comme prochain saut et le reste des sauts vont être sélectionnés de la même façon jusqu'à ce que tous les CHs seront connectés, dont le but est de réduire la distance entre la station de base et les clusters-heads (CHs) et de consommer moins d'énergie.

À chaque période, la phase de communication dans Hybride se divise en deux sous-phases : la première concerne la communication interne et la deuxième la communication externe.

#### 4.3.3.1 Communication interne (intra-cluster)

Cette communication s'effectue à l'intérieur d'un cluster, où chaque nœud envoie ses données vers son cluster head.

#### 4.3.3.2 Communication externe (inter-cluster)

Après la réception des données envoyées par les nœuds ordinaires, les CHs effectuent l'agrégation des données. Ensuite, ils assurent l'acheminement des informations vers la SB.

- **Avantages**

- Les protocoles TDMA sont par nature efficaces en énergie, puisque les nœuds n'allument pas leur radio que lors de leurs propres slots et s'endorment le reste du temps.
- Débit flexible (avec TDMA statistique seulement).
- Pas de fréquences de garde perdues .
- Filtre de fréquence simple (pas besoin de s'adapter à différentes bandes de fréquences).
- Durée de batterie plus élevée.

## 4.4 Simulation et analyse des performances

Une simulation est le fait d'imiter sur un support informatique un phénomène physique, ce qui est possible à l'aide d'un simulateur, qui est un dispositif technique permettant de reproduire de façon virtuelle une situation. Il présente donc sous des conditions contrôlables et observables l'évolution du modèle du phénomène.

On distingue plusieurs modèles de simulation tel que : NS-2, OPNET, OMNET++, TOSSIM, BOIDS, Shawn, nous avons choisis comme environnement de simulation MATLAB.

### 4.4.1 Choix de l'environnement MATLAB

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple, peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées. MATLAB est un interpréteur, car ses instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne, il possède des bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications. MATLAB peut être intégré avec du code C ou FORTRAN, il fonctionne dans plusieurs environnements tels que UNIX/X-Windows, Windows, Macintosh.

### 4.4.2 Modele de consommation d'énergie

Nous utilisons le modèle énergétique décrit dans [13].Heinzelman et al proposent un modèle énergétique. Ainsi, les énergies nécessaires pour transmettre  $E_{Tx}(l, d)$  et recevoir  $E_{Rx}(l, d)$  des messages de  $l$  bits à partir d'un noeud situé à une distance  $d$  sont données par :

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l * E_{elec} + l * E_{fs} * d^2, & \text{si } d < d_0 \\ l * E_{elec} + l * E_{mp} * d^4 & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Où

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

$E_{elec}$  est la quantité d'énergie consommée par bit pour faire fonctionner l'émetteur ou le récepteur.  $E_{fs}$  et  $E_{mp}$  sont respectivement l'énergie dans l'espace libre et celle du modèle multi-chemins.  $E_{Rx}$  est la quantité d'énergie consommée pour la

réception d'un paquet de  $l$  bits. De même, pour recevoir un message de  $l$  bits, la radio consomme :

$$E_{Rx}(l) = l * E_{elec} \quad (4.7)$$

Nous adoptant un modèle simplifié pour la dissipation d'énergie radio, où l'émetteur dissipe de l'énergie durant l'utilisation de son antenne radio pour la transmission des données et le récepteur consomme également de l'énergie pour recevoir les données via son antenne radio.

### 4.4.3 Évaluation de performances

Pour évaluer les performances de notre protocole Hybride DT-LEACH et DECSA, nous l'avons comparé avec le protocole LEACH (le protocole de référence dans les réseaux de capteurs hiérarchiques), ainsi les protocoles DT-LEACH et DECSA qui se basent sur l'approche de clustering .

#### 4.4.3.1 Les paramètres de simulation

Pour que l'évaluation des performances du protocole Hybride DT-LEACH et DECSA par simulation soit efficace, il fallait qu'on prenne en considération les spécificités des réseaux de capteurs pour qu'elle soit réalisable dans des conditions qui se rapprochent de la réalité. Pour cela, certains paramètres ont été pris en compte lors de la simulation. Ces paramètres sont sélectionnés en se basant sur des travaux antérieurs pour des applications similaires ainsi que sur la capacité du simulateur.

Le tableau 4.3 résume quelques paramètres utilisés :

Paramètre	symbole	Valeur
Nombre de nœuds	$n$	100
Energie initiale des nœuds	$E_0$	0.5
Zone couverte		100m*100m
Energie consommée par l'amplificateur pour une petite distance	$E_{fs}$	$10*0.000000000001P_j/\text{bit}/m^2$
Energie consommée par l'amplificateur pour une grande distance	$E_{mp}$	$0.0013*0.000000000001P_j/\text{bit}/m^4$
Energie de transmission et de réception par bit	$E_{elec}$	$50 P_j/\text{bit}$
Energie d'agrégation	$E_{DA}$	$5*0.000000001 \text{ bit}$
Probabilité de cluster	$P$	0.1
Nombre de round maximum	$r_{max}$	5000
La longueur du packet	l	4000 bits

TAB. 4.1 – Paramètres de simulation.

#### 4.4.3.2 Discussion des résultats

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de simulations obtenus suivant la métrique de la durée de vie du réseau.

Les résultats présentés au niveau du graphe de la figure 4.3 montre clairement que notre protocole Hybride DT-LEACH et DECSA apporte une amélioration importante de la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles LEACH, DT-LEACH et DECSA .

- **Les nœuds morts**

Nous avons suivi l'évolution de 100 nœuds dans le temps, dans le but d'étudier la durée de vie du réseau. Nous avons pris une comparaison entre le protocole LEACH, DT-LEACH, DECSA et Hybride, d'où la figure (4.3) qui montre le nombre des nœuds morts . Les résultats de simulation illustrés sur la figure(4.3) montre que notre protocole Hybride apporte une amélioration importante de la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles LEACH, DT-LEACH et DECSA.

Nous constatons que le dernier nœud dans le protocole LEACH meurt aux  $2900^{eme}$  rounds (tours), et avec DT-LEACH il meurt aux  $3200^{eme}$  rounds, et avec DECSA il meurt aux  $3900^{eme}$  rounds, et pour le protocole Hybride le dernier nœud meurt  $4600^{eme}$  rounds .

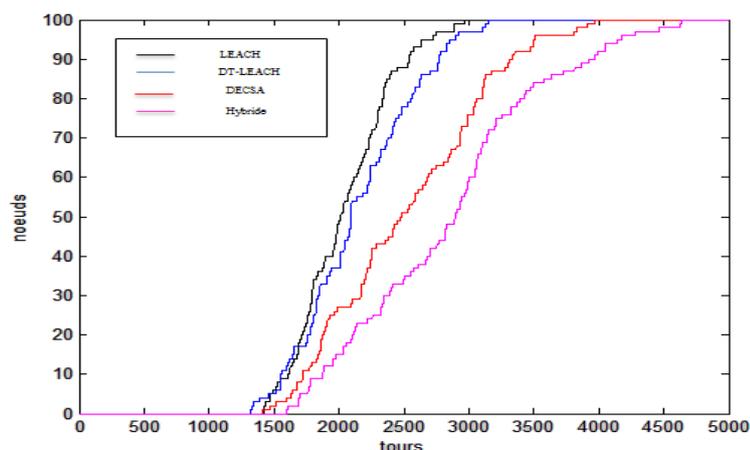


FIG. 4.3 – Les nœuds morts .

#### 4.4.3.3 Étude de validation du protocole Hybride

Dans le but de résoudre le problème d'élection des CH aléatoirement dans la première phase de DECSA, on adopte la phase d'initialisation de DT-LEACH et aussi pour éliminer le problème d'avoir le même CH on utilise la combinaison des deux protocoles DT-LEACH et DECSA .

Le tableau suivant (TAB 4.4) montre le pourcentage de validation de notre protocole Hybride.

Protocoles	le tour du dernier noeud mort	le poucentage
LEACH	2900	
DT-LEACH	3200	10%
DECSA	3900	31%
HYBRIDE	4600	37%

TAB. 4.2 – Le poucentage de validation.

D'après les résultats de simulation :

- Le tour du dernier nœud mort dans DT-LEACH est de 3200 et selon [45], DT-LEACH améliore la durée de vie du réseau d'un pourcentage de 10% par rapport à LEACH.
- Le tour du dernier nœud mort dans DECSA est de 3900. Dans [46], DECSA prolonge la durée de vie du réseau d'un pourcentage de 31% par rapport à LEACH .
- Le tour du dernier nœud mort dans Hybride correspond à 4600, nous remarquons que notre protocole surpasse le protocole DECSA avec un pourcentage de 37%.

la probabilité de tombé dans le même  $P_i$  et  $K(i)$  dans HYBRIDE est inferieur à la probabilité de tombé dans le même  $p_i$  dans DT-LEACH ou le même  $K(i)$  dans DECSA

$$P(P_i) \text{ et } P(K(i)) < P(P_i) \text{ ou } P(K(i))$$

#### 4.4.3.4 Notion de la durée de vie d'un réseau

Dans les réseaux de capteurs sans fil,l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative,qui influe directement sur la durée de vie du réseau en entier ,il existe différentes définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs .Nous voulons seulement citer celles que nous avons choisis comme métriques dévaluation de performances de notre protocole Hybride DT-LEACH et DECSA .

- La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie,
- La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction de nœuds survivants dans le réseau ,
- La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie.

Voici un tableau qui résume les résultats de la simulation :

tests	prtocolos	first-dead	teenth-dead	all-dead
1	LEACH	1495	1593	3008
	DT-LEACH	1307	1419	3098
	DECSA	1591	1743	3959
	HYBRIDE	1400	2037	4851
2	LEACH	1315	1539	3128
	DT-LEACH	1269	1563	2884
	DECSA	1452	1713	3987
	HYBRIDE	1636	2104	4464
3	LEACH	1407	1551	3143
	DT-LEACH	1199	1552	3176
	DECSA	1418	1703	4270
	HYBRIDE	1644	2031	4954
4	LEACH	1435	1575	2899
	DT-LEACH	1321	1508	3047
	DECSA	1445	1592	4273
	HYBRIDE	1528	1994	4912
5	LEACH	1235	1529	2902
	DT-LEACH	1285	1542	2825
	DECSA	1479	1746	3797
	HYBRIDE	1708	2070	4458
6	LEACH	1473	1568	2799
	DT-LEACH	1271	1523	3054
	DECSA	1482	1782	3853
	HYBRIDE	1624	2006	4681
7	LEACH	1380	1608	2919
	DT-LEACH	1261	1493	3056
	DECSA	1450	1676	3841
	HYBRIDE	1455	2014	4741

TAB. 4.3 – Résultats de simulation.

tests	prtocolos	first-dead	teenth-dead	all-dead
8	LEACH	1445	1540	2872
	DT-LEACH	1326	1458	3065
	DECSA	1466	1658	4265
	HYBRIDE	1803	2063	4274
9	LEACH	1325	1574	2825
	DT-LEACH	1346	1483	3164
	DECSA	1332	1733	3669
	HYBRIDE	1544	1892	4655
10	LEACH	1383	1521	2875
	DT-LEACH	1268	1412	2929
	DECSA	1463	1689	3632
	HYBRIDE	1578	2011	4467

TAB. 4.4 – Résultats de simulation(suite).

Protocoles	moyenne du 1 <sup>er</sup> noeud mort	moyenne du 10 <sup>eme</sup> noeud mort	moyenne du dernier noeud mort
LEACH	1389	1560	2937
DT-LEACH	1285	1495	3030
DECSA	1458	1704	3955
HYBRIDE	1529	2022	4646

TAB. 4.5 – La moyenne des résultats de simulation.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus après implémentation des protocoles de routage LEACH, DT-LEACH, DECSA et notre protocole Hybride sur MATLAB. Les résultats obtenus montrent que notre protocole améliore la dissipation d'énergie et prolonge de la durée de vie du réseau.

# Conclusion générale et perspective

Depuis pas mal de temps, les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) occupent une place très importante dans notre société. C'est pour cela que nous nous intéressons à cette nouvelle technologie qui est appliqué dans plusieurs domaines différents. Cependant, pour que les réseaux de capteurs puissent mener à bien leurs missions ils doivent assurer une bonne gestion de la consommation d'énergie étant une opération essentielle en vue de prolonger la durée de vie des RCSFs.

Dans ce travail nous avons débuté par une étude générale sur les RCSFs. Après, nous avons exposé le problème de la consommation de l'énergie qui est considéré comme un facteur principale qui limite la durée de vie d'un capteur, nous nous sommes intéressés à la couche réseau. Pour cela, nous avons fait une etude de Trois Protocoles (LEACH,DT-LEACH,DECSA) de Clusterisation dans les RCSFs. Notre contribution a été inspiré des deux protocoles DT-LEACH et DECSA d'où le résultat d'un protocole hybride et nous espérons avoir apporté une contribution, aussi petite qu'elle soit, à ce domaine qui est en pleine évolution.

Afin de valider les améliorations apportées par notre protocole en terme de prolongement de temps de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique, nous avons simulé le fonctionnement de notre protocole hybride sur MATLAB et comparé les résultats fournis avec ceux du protocole LEACH, DT-LEACH et DECSA.

Ce travail a traité le problème de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil RCSFs. Ceux-ci ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- Remplacer le protocole d'ordonnancement TDMA dans la phase de communication par le protocole d'ordonnancement S-TDMA (sensor time division multiple acces) qui apporte un gain considérable en terme d'énergie comparent avec TDMA qui a comme inconvénient majeur la perte de temps et de l'énergie avec un nœud

qui n'a pas des données à envoyer. Par contre, S-TDMA affecte des slots de temps aux nœuds selon le nombre de données qu'ils ont collectées. Si un nœud a collecté  $m$  données, alors il aura un slot de temps équivalent à  $(m \cdot T_x)$  et s'il n'a aucune données alors il n'aura pas de slots.

- Examiner le cas de plusieurs stations de base.
- Examiner le cas d'une station de base mobile.

# Bibliographie

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci , "A Survey on Sensor Networks". IEEE Communications Magazine, August 2002.
  
- [2] P.Kahn , P.S. Dominique and V. Dominique, "Anticipation, innovation, perception : Des défis pour la maîtrise des risques à l'horizon". Editeur : Paris : Ed.TECHNIQUE and DOCUMENTATION, Edition SRD, lavoisier, pages 64-67, ISBN : 978-2-7430-1295-3, septembre 2010 .
  
- [3] K.Holger and A.Willig, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", ISBN : 978-0-470-09510-2, Wiley, 2005.
  
- [4] M. Ilyas and I. Mahgoub, "Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
  
- [5] J. Lester Hill, "System Architecture for Wireless Sensor Networks", University of California, Berkeley, 2003.
  
- [6] V. Handziski, A. Kopke, H. Karl, and A. Wolisz, "A common wireless sensor network architecture", Technische University Berlin, pp.10-17, July 2003.
  
- [7] K. Romer and F. Mattern, "The design space of wireless sensor networks",in IEEE Wireless Communications, 2006.

- [8] S.Sentilles ,” Architecture logicielle pour capteurs sans-fil en réseau ”, Rapport de recherche, Université de Pau et des Pays de l’Adour, juin 2006.
- [9] Y.Challal, ” Réseaux de Capteurs Sans Fils ”, Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France, 17 Novembre 2008.
- [10] N.Lasla ,” La gestion de clés dans les réseaux de capteurs sans-fil ”, mémoire de magister, Institut National de formation en Informatique (I.N.I) Oued-Smar, Alger,2009.
- [11] P. Johnson and D.C Andrews,”Remote continuous monitoring in the home”, Journal of Telemedicine and Telecare, Volume.2, No.2, pages 107-113, June 1996.
- [12] S.Moad , ” Optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil” ,Master recherche en 2ème année informatique Université : FSIC-Rennes 1, Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA ,2008.
- [13] W.Rabiner Heinzelman, A.Chandrakasan, and H.Balakri-shnan,”Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”. In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii , International Conference on System Sciences,pages 10-pp, ieeexplore.ieee.org , 2000.
- [14] M. Younis and T. Nadeem, ”Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks”, Technical report, university of Mrylandbaltimre County, USA, 2004.
- [15] H. Namgoog, D. Lee, and D. Nam, ”Energy efficient topology for wireless microsensor networks”, ACM, PE-WASUN, October, 2005.
- [16] W. Ye, J.Heidemann, and D.Estrin,”Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks” , IEEE/ACM Transaction on Networking, vol. 12,pp.493-506,2004.
- [17] M. Ali, A.Bohm, and M. Jonsson, ”Wireless sensor networks for surveillance applications- A comparative survey of MAC protocolols”,In Proceedings of

- the 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications, pp.399-403,2008.
- [18] Y. Xu, J. Heidemann, and D.Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", In Proceeding of the 7th annual International conference on Mobile computing and networking, pp. 70-84, 2001.
- [19] V.Raghunathan, C.Schurgers, S Park, and M-B. Srivastava, "Energy-Aware Wireless Microsensor Networks", IEEE Sinal Processing Magazine, Vol. 19, pp.40-50,2002.
- [20] K.Akkaya and M. Younis , " A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks ", Elsevier, Ad Hoc Network Journal, Vol 3/3 pp. 325-349, 2005.
- [21] F. Z. Benhamida, " La tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil ", Rapport du mini projet, Institut National de Formation en Informatique INI, Algérie, 2006/2007.
- [22] I.F. Akyildiz and M. C.VURAN, " Wireless Sensor Networks", John Wiley and Sons Ltd, 2010.
- [23] J. Cecilio, J. Costa and P. Furtado, "Survey on Data Routing in Wireless Sensor Networks" ,Springer-Verlag ,Berlin Heidelberg, 2010.
- [24] I. Mahgoub and J. Ibriq, "Cluster-Based Routing in Wireless Sensor Networks : Issues and Challenges", International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems , Page(s) :759-769, California University, 2004.
- [25] H. Hadjammar and N. Doufene, " Routage dans les réseaux de capteurs optimisation du protocole Directed Diffusion", Projet de fin d'étude, Institut National de formation en Informatique INI, Algérie, 2006.
- [26] M. Ali and S. K. Ravula, "Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks", Technical report, IDE0805, January 2008.

- [27] A. Bharathidasan and V. Anad Sau Ponduru, " Sensor networks : An overview ",département d'informatique de Californie,2014.
- [28] M. Lehssaini, " Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique", Thèse de Doctorat en informatique, Université de Tlemcen et Université de Franche-Comté, 2009.
- [29] M. Sedjelmaci, " mise en œuvre de mécanismes de sécurité basés sur les IDS pour les réseaux de capteurs sans fils", Thèse de Doctorat en informatique, Université de Tlemcen, 2012.
- [30] O.Younis, S. Fahmy ,"Distributed clustering in ad-hoc sensor networks : A hybrid, energy-efficient approach " , ieeexplore.ieee.org,2004.
- [31] D. Dhoutaut," Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France, 2003.
- [32] D. Liu, P Ning, "Location-based pairwise key establishments for static sensor networks", In SASN 03 : Proceedings of the 1st ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks, New York, NY, USA. pp. 72-82. 2003.
- [33] E.DHIB, " Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de Capteurs ",Ingénieur en Télécommunications option : Ingénierie des réseaux, Ecole supérieure de communication de Tunis,2006/2007 .
- [34] W.Heizelman,J.Kulik,and H.Balakrishnan," Adaptative protlols for information dissemination in wireless sensor networks",1999.
- [35] I.Butun, In-hoRa and R.Sankar, "PCAC : Power-and Connectivity-Aware Clustering for Wireless Sensor Networks ", Journal on Wireless Communications and Networking ,Springer,2015.

- [36] M.Elizabeth and R.Belding,” Hierarchical Routing in Ad Hoc Mobile Networks.Wireless Communications and Mobile Computing”, pp.32-515, 2002.
- [37] CC.Chiang, HK.Wu, W.Liu and M.Gerla,” Routing In Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks With Fading Channel”, In Proceedings of the IEEE Singapore International Conference on Networks , pp. 197-212, Singapore, August 1997.
- [38] TC.Hou and TJ.Tsai,” An Access-Based Clustering Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp. 1201-1210,2001.
- [39] U.C. Kozat and al,” Virtual dynamic backbone for mobile ad hoc networks”, IEEE ICC 01, 1 pp.10-1201, 2001.
- [40] Marc R. Pearlman and Zygmunt J. Haas,”Determining the Optimal Conguration for the Zone Routing Protocol”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp.1395-1414,ISSN 0733-8716,1999.
- [41] A.Iwata, CC.Chiang, G.Pei, M.Gerla and T.Chen,” Scalable Routing Strategies for Ad Hoc Wireless Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp. 1369-1379, 1999.
- [42] JN.Al-Karaki, AE.Kamal, ”Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey ”, Magazine : IEEE Communications, vol. 11, N° 6, pp. 6-28, Décembre 2004.
- [43] S.Basagni, I.Chlamtac and A.Fargo, ”A Generaphy-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing”, In proceedings of workshop on Algorithmic Aspects of communication (satellite workshop of ICALP), July 1997.
- [44] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, “An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 660–667, 2002.

- [45] S.H. Kang and T. Nguyen, "Distance based thresholds for cluster head selection in wireless sensor networks", *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 9, pp.1396-1399, 2012.
- [46] Z.Yong, Q.Pei, "A Energy-Efficient Clustering Routing Algorithm Based on Distance and Residual Energy for Wireless Sensor Networks", *International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE)*,2012.

## ***Résumé***

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont de plus en plus déployés dans une variété d'applications. D'abord, dans le domaine militaire, application médicales. Un RCSF standard se compose d'un ensemble de capteurs qui communique avec le monde extérieur via une SB. Un capteur est un petit appareil alimenté par une batterie épuisable à durée de vie limitée et non rechargeable, c'est pourquoi un grand nombre de chercheurs ont proposé des solutions à économie d'énergie au niveau de la pile protocolaire dans le but de maximiser la durée de vie du réseau.

Dans ce mémoire nous avons choisi la technique de clustering et les protocoles de routages hiérarchiques pour maintenir la durée de vie du réseau, c'est dans ce but que nous avons proposé un protocole Hybride qui est une combinaison de deux grandes approches de routage DT-LEACH et DECSA.

Les résultats de simulations ont prouvé que notre protocole est efficace en terme de consommation d'énergie et de prolongation de la durée de vie du réseau.

### ***Mot clés***

Réseaux de capteurs, Protocoles de routage hiérarchiques, Economie d'énergie, Clustering .

## ***Abstract***

Wireless sensor networks (WSNs) are increasingly deployed in a variety of applications. First, in the military, medical application. A WSN standard consists of a set sensor that communicates with the outside world via a BS. A sensor is a small device powered by a depletable battery life and limited non-rechargeable, it why many researchers have proposed energy-saving solutions at the protocol stack in order to maximize the term network life. In this paper we chose the clustering technique and hierarchical routing protocols to maintain the life of the network, it this purpose we proposed a Hybrid protocol that is a combination of two main approaches to routing DT-LEACH and DECSA. Simulation results showed that our protocol is efficient in energy consumption term and extending the life of the network.

### ***Key words***

sensor networks, routing protocols hierarchical , Energy saving, Clustering.