

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Abderrahmane Mira de Bejaia*



*Faculté des Sciences Exactes*

*Département d'informatique*

## ***MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE***

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

*Option : Administration et sécurité réseaux*

*Thème*

---

### ***Routage hiérarchique dans les Réseaux Capteurs Sans Fil (RCSF) : LEACH et ses variantes***

---

Réalisé par :

*Mr YAHIAOUI Youcef*

Soutenu devant le jury composé de :

Présidente	:	REBOUH Nadjette	MAA	UNIV DE BEJAIA
Rapporteur	:	BOULFEKHAR Samra	MCA	UNIV DE BEJAIA
Examinatrice	:	BOURAOU I Ilham	MAB	UNIV DE BEJAIA

Promotion : 2015/2016

---

# Remerciements

---

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant qui nous a donné le courage,  
la force et la volonté pour mener ce travail.*

*Un grand merci pour ma familles, surtout mes parents qui m ont épaulé, soutenu et  
suivi tout au long de ce projet.*

*A nos chères amis qui ont toujours été présents et fidèles.*

*A mon encadreur **Meme. BOUFEKHAR Samra** pour tout le temps qu'elle ma  
consacré, pour ces précieux conseils et pour toute son aide et son appui durant la  
réalisation.*

*Aussi à tous les enseignants et employés du département Informatique à qui on  
doit notre avancement.*

*Enfin, nous tenons aussi à remercier également tous les membres du jury pour  
avoir accepté d'évaluer notre travail.*

---

# Dédicaces

---

*A mes parents : rien ou monde ne pourra compenser les sacrifices qu'ils avaient consentis pour mon éducation, ma formation et mon bien être. Que dieu les protège, les gardes, les prête longues vies et bonne santé.*

*A mes chers frères Mohamed, Kamel, Hamza*

*A mes sœurs pour leur soutien Naima, Amina ;*

*A mes neveux que j'aime beaucoup Anes, Ilyes, Rafik, Zakaria ;*

*A mon beau frère Hocine et ma belle soeur Fella*

*A toute la famille Yahiaoui ;*

*A mes amis Zaki, Halim, Rahim, Zizou, Amine, Badrou, Mohamed, Koukou, Aimad, Larbi, zedame, abd enour .*

*Mes amies Siham, Lila, Meriem*

*Tous ceux que j'aime, **LAMIA** en particulier.*

**YAHIAOUI Youcef**

# 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 Réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Réseaux Ad hoc . . . . .	4
1.2.1 Définition . . . . .	4
1.2.2 Caractéristiques des réseaux Ad Hoc . . . . .	5
1.3 Réseaux de capteurs sans fil . . . . .	5
1.3.1 Notion d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	6
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	6
1.3.3 Architecture d'un capteur . . . . .	8
1.3.4 Caractéristiques du réseau de capteurs . . . . .	11
1.3.5 Domaine d'application des réseaux de capteur sans fil . . . . .	12
1.3.6 Classes d'application des RCSF . . . . .	13
1.3.7 Communication dans les réseaux de capteurs . . . . .	14
1.3.8 Facteurs de conception des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	19
1.4 Conclusion . . . . .	21

---

<b>2</b>	<b>Routage dans les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs . . . . .	23
2.2.1	Route à énergie disponible maximale . . . . .	24
2.2.2	Route à énergie de transmission minimale . . . . .	24
2.2.3	Route à nombre de sauts minimum . . . . .	24
2.2.4	Route à nœud ayant le maximum des minimums des énergies disponibles . . . . .	25
2.3	Protocoles de routage pour un réseau de capteurs sans fil . . . . .	25
2.3.1	Routage à plat . . . . .	25
2.3.2	Routage hiérarchique . . . . .	27
2.3.3	Routage géographique . . . . .	29
2.4	Protocoles basés sur l'initiateur de communication . . . . .	30
2.4.1	Communication lancée par la source . . . . .	30
2.4.2	Communication lancée par la destination . . . . .	31
2.5	Protocoles basés sur le fonctionnement des protocoles . . . . .	31
2.5.1	Routage basé sur la qualité de service . . . . .	31
2.5.2	Routage basé sur la négociation de données . . . . .	32
2.5.3	Routage multi chemins . . . . .	33
2.5.4	Routage basé sur le flux de données dans le réseau . . . . .	33
2.6	Conclusion . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Routage hiérarchique dans les RCSFs : LEACH et ses variantes</b>	<b>35</b>
3.1	Introduction . . . . .	35
3.2	Définition . . . . .	36
3.3	Approche de clustérisations pour les RCSFs . . . . .	36
3.3.1	Protocoles hiérarchiques à temps de convergence constant . . .	36
3.3.2	Protocole hiérarchique à temps de convergence variable . . . .	37
3.3.3	Protocoles hiérarchiques heuristiques . . . . .	37
3.3.4	Protocoles hiérarchiques pondérés . . . . .	38
3.3.5	Protocoles hiérarchiques émergents . . . . .	38
3.4	Avantages de l'approche de clustérisation . . . . .	39
3.5	Protocole LEACH et ses variantes . . . . .	40
3.5.1	LAECH (Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy) . . . . .	40
3.5.2	Les variantes de LEACH . . . . .	41

---

3.5.3	Comparaison entre les différentes variantes de LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) . . . . .	47
3.6	Conclusion . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Evaluation de performances de LEACH et ses variantes</b>	<b>50</b>
4.1	Introduction . . . . .	50
4.2	Simulateurs de réseau de capteurs . . . . .	51
4.3	Choix de l'environnement de simulation . . . . .	51
4.4	Paramètres de simulation . . . . .	52
4.5	Métriques d'évaluation de performance . . . . .	52
4.5.1	Energie consommée . . . . .	52
4.5.2	Durée de vie du réseau . . . . .	53
4.5.3	Scalabilité . . . . .	53
4.5.4	Nombre de paquet par rapport aux nœuds capteurs dans le reseau . . . . .	53
4.5.5	Nombre de paquet par rapport au temps . . . . .	53
4.6	Discussions des résultat de simulation . . . . .	54
4.6.1	Energie consommée . . . . .	54
4.6.2	Durée de vie du réseau . . . . .	54
4.6.3	Scalabilité . . . . .	55
4.6.4	Nombre de paquet par rapport aux nœuds capteurs dans le réseau . . . . .	56
4.6.5	Nombre de paquet par rapport au temps . . . . .	57
4.7	Conclusion . . . . .	58
	<b>Conclusion générale</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>61</b>

# Table des figures

1.1	Comparaison des topologies client-serveur et P2P [4]. . . . .	4
1.2	Architecture d'un réseau de capteur [9]. . . . .	7
1.3	Architecture plate [8]. . . . .	8
1.4	Architecture hiérarchique [8]. . . . .	8
1.5	Architecture d'un noeud capteur. . . . .	9
1.6	Exemples de nœuds capteurs (Berkeley Mote ) . . . . .	10
1.7	Modèle en couches (pile protocolaire) d'une architecture de réseau de capteurs [14]. . . . .	15
1.8	Types de communication dans un RCSF. . . . .	18
2.1	Route efficaces en consommation d'énergie. . . . .	23
2.2	Classes de protocoles du routage. . . . .	25
2.3	Routage data-centric . . . . .	26
2.4	Routage hiérarchique . . . . .	28
4.1	Energie résiduelle part rapport au temps des trois protocoles. . . . .	54
4.2	Nombre des noeuds vivantes. . . . .	55
4.3	Scalabilité. . . . .	55
4.4	Nombre de paquets émis par les nœuds . . . . .	56
4.5	Nombre de paquets recus par les nœuds . . . . .	56
4.6	Nombre paquet émis par rapport au temps. . . . .	57
4.7	Nombre paquet recus par rapport au temps. . . . .	57

# Liste des tableaux

3.1	Approches de Clustérisations dans les RCSFs . . . . .	39
3.2	Comparaison entre les différentes variantes de LEACH [31]. . . . .	48
4.1	Paramètres de simulation. . . . .	52



# Liste des abréviations

<b>RCSF</b>	<b>R</b> éseaux de <b>C</b> apteur <b>S</b> ans <b>F</b> il
<b>WSN</b>	<b>W</b> ireless <b>S</b> ensor <b>N</b> etworks
<b>MEMS</b>	<b>M</b> omputer <b>I</b> nformation <b>S</b> ystem <b>C</b> ompany
<b>MANET</b>	<b>M</b> obile ad hoc <b>N</b> etwork
<b>P2P</b>	<b>P</b> eer <b>T</b> o <b>P</b> eer
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
<b>ADC</b>	<b>A</b> nalog to <b>D</b> igital <b>C</b> onverter
<b>RF</b>	<b>R</b> adio <b>F</b> erequency
<b>OS</b>	<b>O</b> perating <b>S</b> ystem
<b>IP</b>	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
<b>OSI</b>	<b>O</b> pen <b>S</b> ystems <b>I</b> nterconnexion
<b>MAC</b>	<b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
<b>SPIN</b>	<b>S</b> ensor <b>P</b> rotocols for <b>I</b> nformation via <b>N</b> egotiation
<b>DD</b>	<b>D</b> irect <b>D</b> iffusion
<b>IP</b>	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
<b>ISO</b>	<b>I</b> nternational <b>S</b> tandardization <b>O</b> rganization
<b>TEEN</b>	<b>T</b> hreshold sensitive <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient sensor <b>N</b> etwork protocol
<b>APTEEN</b>	<b>A</b> daptive <b>P</b> eriod <b>T</b> hreshold sensitive <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient sensor <b>N</b> etwork protocol
<b>SOP</b>	<b>S</b> elf <b>O</b> rganizing <b>P</b> rotocol
<b>VGAR</b>	<b>V</b> irtual <b>G</b> rid <b>A</b> rchitecture <b>R</b> outing
<b>MECN</b>	<b>M</b> inimum <b>E</b> nergy <b>C</b> ommunication <b>N</b> etwork
<b>SMECN</b>	<b>S</b> mall <b>M</b> inimum <b>E</b> nergy <b>C</b> ommunication <b>N</b> etwork
<b>GAF</b>	<b>G</b> eographie <b>A</b> daptive <b>F</b> idelity
<b>GEAR</b>	<b>G</b> eographie and <b>E</b> nergy <b>A</b> ware <b>R</b> outing
<b>ALS</b>	<b>A</b> nchor <b>L</b> ocation <b>S</b> ervice

<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality of <b>S</b> ervice
<b>EAR</b>	<b>E</b> nergy <b>A</b> ware <b>R</b> outing
<b>EECS</b>	<b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>C</b> lustering <b>S</b> cheme in WSN
<b>CH</b>	<b>C</b> luster <b>H</b> ead
<b>EEHS</b>	<b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>H</b> ierarchical <b>C</b> lustering
<b>RCC</b>	<b>R</b> andom <b>C</b> ompetition based <b>C</b> lustering
<b>CLUBS</b>	<b>A</b> lgorithm for Group Formation In An Amorphous Computer
<b>LCA</b>	<b>L</b> inked <b>C</b> luster <b>A</b> lgorithm
<b>WCA</b>	<b>W</b> eighted <b>C</b> lustering <b>A</b> lgorithm
<b>LEACH</b>	<b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>LEACH-C</b>	<b>C</b> entralized <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>LEACH-F</b>	<b>F</b> ixed number of <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>LEACH-B</b>	<b>B</b> alanced <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>TL-LEACH</b>	<b>T</b> ow <b>L</b> evel <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>LEACH-E</b>	<b>E</b> nergy <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>MH-LEACH</b>	<b>M</b> ulti <b>H</b> op <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>LEACH-M</b>	<b>M</b> obile <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>I-LEACH</b>	<b>I</b> mproved <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>LEACH-A</b>	<b>A</b> dvanced <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>Cell-LEACH</b>	<b>C</b> ell <b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptation <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy

# Introduction générale

Le besoin d'être informé, à tout moment, des évolutions de l'environnement qui nous entoure, a mené l'être humain à perfectionner, chaque fois que c'est nécessaire, les moyens de communication et d'information. L'avènement des réseaux sans fil a élargi considérablement les horizons d'utilisation des équipements de collecte et de transmission des données sans le souci des éléments d'interconnexion classiques comme les câbles.

D'autres part, l'avancé technique a réduit, de plus en plus, la taille et le coût des équipements utilisés. Ainsi, les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs) ont vu le jour combinant un nombre conséquent de capteurs de faible coût (donc une zone de couverture très vaste) et un support de transmission fiable et omniprésent.

Un RCSF est constitué de plusieurs nœuds (appelés capteurs) dispersés sur une zone géographique vaste afin de collecter des informations sur des événements bien définis, et de les acheminer vers un nœud particulier de traitement, appelé puits (sink) ou bien station de base(BS). Cependant, un capteur est un équipement de taille très réduite, englobant des ressources très limitées en matière de mémoire et de calcul et alimenté avec des batteries de faible puissance. Ces caractéristiques spécifiques impliquent de nouveaux défis lors de la mise en œuvre d'un réseau, le routage et le contrôle du réseau, le traitement collaboratif des informations, la collecte et la dissémination des données [12].

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destina-

taires. On parle de routage dans différents domaines : réseaux téléphoniques, réseaux électroniques (comme Internet), réseaux de transports, etc.

Dans un protocole de routage à topologie plate, tous les nœuds effectuent les mêmes tâches et disséminent des données souvent redondantes, vu la densité d'un RSCF, vers le puits, ce qui épuise leurs capacités énergétiques plus rapidement. Le routage géographique nécessite, quant à lui, des informations sur la localisation géographique des nœuds pour parvenir à transmettre les données vers la zone la plus adéquate, ce qui génère une surconsommation de l'énergie au niveau du réseau.

Par contre, le routage hiérarchique regroupe les nœuds en clusters ou le Cluster Head (représentant ou chef de cluster) de chaque cluster pour principale fonction la gestion des communications de paquets transmis par ces membres de groupe de dirigés vers ces derniers. Une autre fonction intéressante qui peut être attribuée à ces ClusterHead est l'agrégation de données pour limiter la taille des données transmises vers la station de base. Les autres nœuds membres ne se chargent que d'une dissémination locale vers leurs ClusterHeads. Cette technique permet plus d'économie en énergie et garantit un meilleur passage à l'échelle.

Plusieurs solutions de routage hiérarchique sont présentées dans la littérature chacune d'elle présente une technique différente pour minimiser la consommation de l'énergie sur l'ensemble du réseau. Néanmoins, des améliorations restent à apporter pour achever de meilleures performances.

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser au protocole LEACH, et nous allons essayer de le comparer avec ses quelques variantes selon quelques critères de performances. Le routage hiérarchique est considéré comme un outil permettant plus de performance en ce qui concerne la consommation de l'énergie par rapport aux autres types de routage .

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, le premier chapitre nous donne un aperçu sur les réseaux ad-hoc et sur les RSCFs en particulier, leurs caractéristiques, leurs architectures et leurs différents domaines d'application.

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art sur les protocoles de routage proposés pour les RSCFs.

Nous nous intéressons, dans le troisième chapitre, plus particulièrement, au routage hiérarchique dans les RCSFs, et le protocole LEACH ainsi qu'à ses différentes variantes.

Le quatrième chapitre, est consacré à la simulation du protocole de routage LEACH ainsi qu'à ses deux variantes TL-LEACH et MG-LEACH.

Enfin, nous conclurons ce travail en résumant les connaissances acquises le long de ce projet et les perspectives.

# Réseaux de capteurs sans fil

## 1.1 Introduction

En 1999, elle est considérée comme " l'une des 21 idées pour le 21ème siècle" et en 2003 on nous annonce que c'est "l'une des 10 nouvelles technologies qui vont bouleverser le monde " . Cette technologie révolutionnaire n'est autre que les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou plus connue sous le nom de ***Wireless Sensor Networks*** (WSN). Le développement de tels réseaux a été accompli grâce aux avancées techniques et technologiques réalisées dans les domaines de la micro-électromécanique(MEMS), les communications sans fil et la micro-électronique[1].

Les RCSFs sont basés sur l'effort collaboratif d'un grand nombre de nœuds qui opèrent d'une manière autonome et complètement transparente pour l'utilisateur. Ces nœuds, communément appelés capteurs, sont des dispositifs d'une taille minuscule qui intègrent des unités de calcul et de communication sans fil. Le rôle de ces capteurs consiste à détecter un phénomène dans un environnement proche, de traiter les données captées et enfin envoyer le résultat de l'analyse via un support de transmission sans fil [1].

Dans ce premier chapitre, nous définissons tout d'abord les réseaux ad hoc, en décrivant leurs principales caractéristiques. Nous consacrons ensuite le reste du chapitre à l'étude des capteurs sans fil : leur notion, leur architecture et leur domaine et type d'application .

## 1.2 Réseaux Ad hoc

À l'heure actuelle, plusieurs systèmes utilisent le modèle cellulaire des réseaux sans fil. Leur inconvénient majeur est qu'ils requièrent une importante infrastructure fixe qui peut être soumise à des risques de destruction dans certaines applications comme le domaine militaire où la capacité à se reconfigurer et à demeurer opérationnelle reste un objectif fondamental. La contrepartie des réseaux cellulaires est les réseaux mobiles Ad Hoc qui sont apparus pour pallier à ce type de désagréments [2].

### 1.2.1 Définition

Un réseau mobile Ad Hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque et dont le seul moyen de communication est l'utilisation des interfaces sans fil, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée [3].

Les nœuds de ce type de réseau peuvent servir de routeurs et de serveurs fonctionnant sur le principe de pair-à-pair P2P (Peer to Peer) [4]. Dans les réseaux Ad Hoc qui ont cette propriété, la défaillance d'un nœud ne met pas en péril l'accès à la ressource, contrairement à un réseau client-serveur où la donnée est fournie par le serveur. Par conséquent, si le serveur devient inaccessible par le réseau, les nœuds seront bloqués.

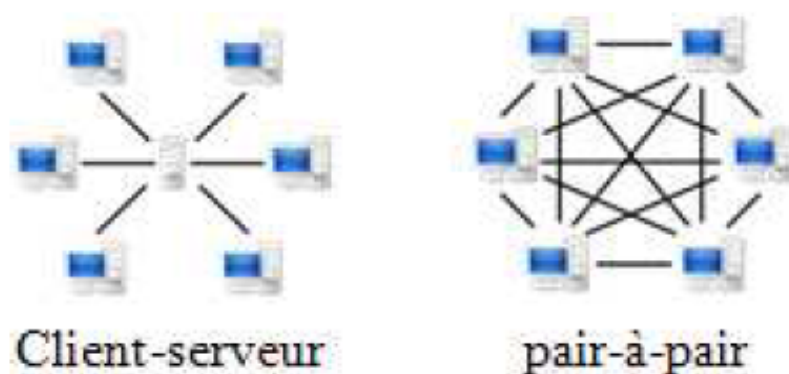


FIG. 1.1 – Comparaison des topologies client-serveur et P2P [4].

Si dans le passé, la notion des réseaux Ad Hoc était associée à la communication sur des champs de combat et à l'emplacement des zones dévastées, aujourd'hui, ce n'est plus le cas. En effet, l'utilisation de ce type de réseaux est devenue dans le domaine civil (opérations de secours, incendies, tremblements de terre, missions d'exploration, réseaux de communication, etc.).

### 1.2.2 Caractéristiques des réseaux Ad Hoc

En plus des caractéristiques des réseaux sans fil en général, les réseaux Ad Hoc ont les caractéristiques suivantes :

- **Architecture décentralisée** : Cela fait référence à un système sans entité centralisée et sans contrôle extérieur. Par conséquent, les nœuds interagissent, analysent et traitent les données sans faire appel à d'autres dispositifs exotiques [2].

- **Auto-organisation** : Les nœuds découvrent automatiquement et d'une manière autonome les différents paramètres leur permettant de s'intégrer dans l'environnement et de s'auto-configurer pour devenir opérationnels [2].

- **Sécurité** : L'absence d'infrastructure fixe pénalise l'ensemble du réseau dans la mesure où il faut faire abstraction de toute entité centrale de gestion pour l'accès aux ressources[6]. Cela fait que la sécurité dans les réseaux Ad Hoc soit plus pénible à assurer. De plus, les nœuds d'un réseau Ad Hoc assurent la fonction de reconfiguration contrairement à un réseau avec infrastructure où la gestion du rapport de confiance ne se fait qu'entre le nœud et la station. Dans les réseaux Ad Hoc, cette gestion de confiance mutuelle se fait sur tout l'ensemble des nœuds. Par ailleurs, les nœuds Ad Hoc étant fortement mobiles, leur sécurité physique est moins assurée que pour un poste de travail fixe, dans un bureau par exemple.

## 1.3 Réseaux de capteurs sans fil

Contrairement aux réseaux filaires traditionnels, les réseaux de capteurs sans fil offrent une grande flexibilité tout en s'affranchissant aux problèmes liés au câblage et à la mobilité des nœuds. Dans le paragraphe suivant, nous étudierons ce nouveau type de réseaux sans fil, son architecture, ses caractéristiques, et différents domaines d'application.



### 1.3.1 Notion d'un réseau de capteur sans fil

Les nouveaux systèmes d'acquisition, basés sur des réseaux de capteurs sans fil, sont le fruit du développement conjoint des technologies sans fil de ces dernières années et de la miniaturisation des architectures électroniques. Avant cette évolution, l'acheminement des informations relevées par un capteur était réalisé via un support de transmission filaire, encombrant et coûteux, et son installation devait justifier de perspectives de profits économiques importants. A présent, chaque capteur également appelé "nœud" est doté d'un circuit radio lui permettant de transmettre et de recevoir des informations via un médium sans fil [6].

### 1.3.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Un RCSF est typiquement constitué d'un champ de captage, plusieurs nœuds capteurs, une station de base et un centre de traitement des données [7][8] :

- **Le champ de captage (espace de collecte) :**

il est considéré comme étant la zone d'intérêt pour le phénomène capté, donc les nœuds capteurs y sont placés.

- **Les nœuds capteurs :**

ce sont le cœur du réseau, leur rôle est d collecter les données et de les router vers la station de base. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des batteries.

- **Le sink (station de base, puits) :**

c'est un nœud particulier chargé d'accueillir, stoker et traiter les données en provenance des autres nœuds et de diffuser les différentes requêtes au réseau. Sa source d'énergie doit être illimitée puisqu'il faut qu'il reste toujours actif pour recevoir les données. Le sink peut être un simple nœud doté d'interfaces réseaux supplémentaires (le plus souvent GPRS ou Ethernet), ou bien une entité extérieure au réseau comme un ordinateur portable ou un PDA.

- **Centre de traitement des données (gestionnaire de tâches) :**

Il reçoit les données collectées par le sink, son rôle consiste à les regrouper et les traiter pour en extraire les informations utiles.

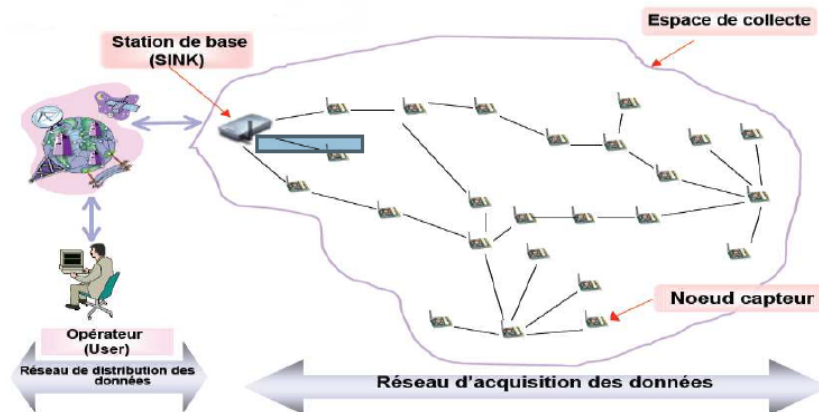


FIG. 1.2 – Architecture d'un réseau de capteur [9].

Comme le montre la fig1.2, un RCSF est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs éparpillés sur le champ de captage. Quand le sink diffuse une requête, les nœuds collaborent entre eux pour lui envoyer les informations captées à travers une architecture multi-saut. Le puits transmet ensuite ces données par internet ou par satellite au gestionnaire de tâches pour les analyser et prendre des décisions [10]. A un niveau plus élevé un WSN peut être vu comme étant une combinaison de deux entités de réseau :

- **Le réseau d'acquisition des données** : c'est l'union des nœuds capteurs et du sink. Son rôle consiste à collecter les données à partir de l'environnement et de rassembler au sink.
- **Le réseau de distribution des données** : son rôle est de connecter le réseau d'acquisition des données à utilisateur[7].

Il existe deux types d'architecture pour les RCSFs [11] :

#### a/ les réseaux de capteur sans fil plats

Un réseau de capteur sans fil plat est un réseau homogène, où tous les nœuds disposent des mêmes capacités et fonctionnalités concernant le captage, la communication et la complexité du matériel, seul le sink échappe à cette règle puisqu'il joue le rôle d'une passerelle chargée de la collecte des données issues des différents nœuds capteur pour les transmettre à l'utilisateur

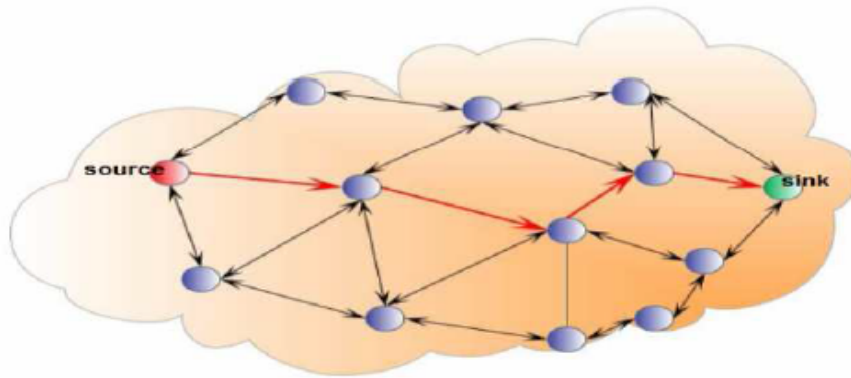


FIG. 1.3 – Architecture plate [8].

#### b/ les réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques

Un réseau de capteurs hiérarchiques est un réseau hétérogène où les nœuds ont des capacités différentes, par exemple certains nœuds peuvent disposer d'une source d'énergie plus importante, une plus longue portée de communication et/ou une plus grande puissance de calcul. Ceci permet de décharger la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau.

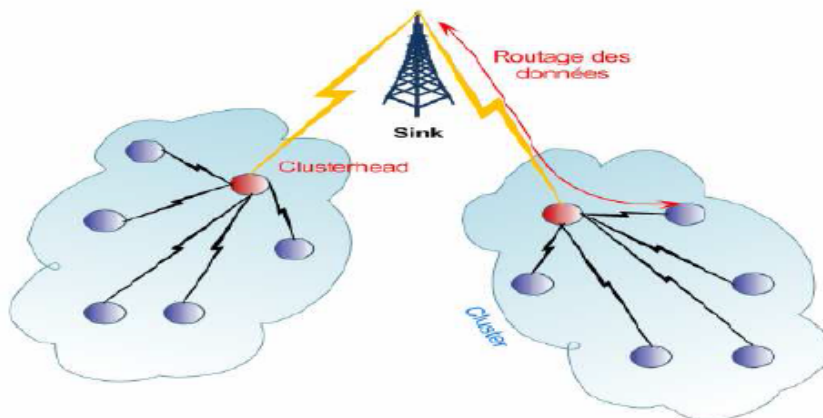


FIG. 1.4 – Architecture hiérarchique [8].

### 1.3.3 Architecture d'un capteur

L'architecture d'un capteur comporte deux parties : matériel et système d'exploitation embarqué.

### a/ Matériel

Un nœud capteur est composé de quatre unités ou sous-systèmes principaux (voir figure 1.5). Il s'agit des sous-systèmes : de calcul ou traitement, communication, perception et de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, un ensemble supplémentaire de modules selon le domaine d'application, comme le système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité, un générateur d'énergie (cellule solaire) ainsi qu'un système de localisation GPS, (Global Positioning System) [11]

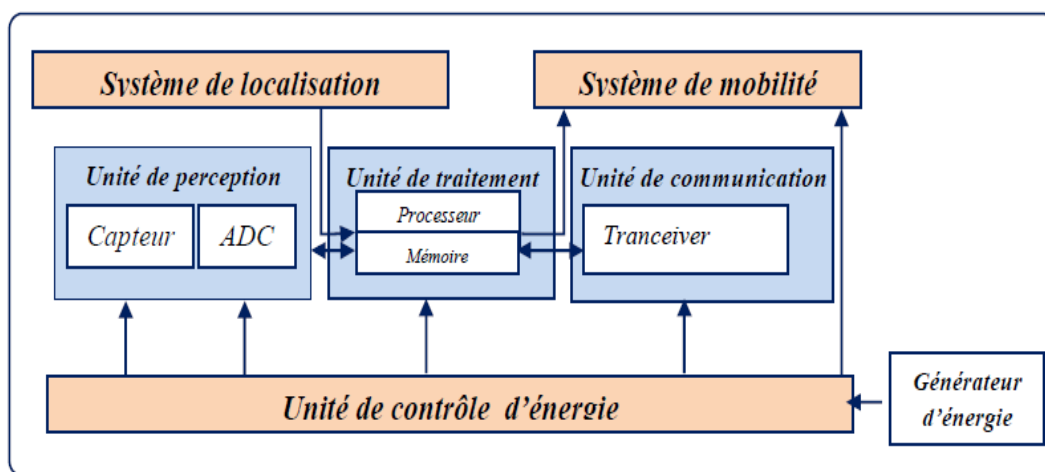


FIG. 1.5 – Architecture d'un nœud capteur.

- **L'unité de perception** : est composée de deux sous-unités : un capteur et un convertisseur Analogique/Numérique (ADC pour Analog to Digital Converter). Le capteur permet de relier le nœud avec son environnement extérieur, il est responsable de fournir des signaux analogiques basés sur les phénomènes observés à l'ADC. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement pour pouvoir l'analyser [11].

- **L'unité de traitement** : est à la charge du contrôle des capteurs et la gestion des procédures et protocoles de communication. De plus le microcontrôleur ou le microprocesseur embarqué est associé généralement à une unité de stockage nécessaire à l'implantation et à l'exécution d'un programme (logiciel) qui peut être un système d'exploitation spécialement conçu pour les capteurs (TinyOS par exemple). Ce microprocesseur peut fonctionner selon des modes différents en fonction de la consommation souhaitée ou de la quantité d'énergie restante dans la batterie [11].

- **L'unité de communication** : responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions de données sur un medium sans fil afin de permettre l'échange d'informations entre le nœud capteur et son environnement extérieur. Dépendamment du domaine d'application, trois médiums de communication sans fil peuvent être utilisés : optique (laser), infrarouge et radiofréquences (RF : radio frequency). Le laser et l'infrarouge n'utilisent aucune antenne mais leurs capacités de diffusion sont limitées, contrairement à la RF qui nécessite une antenne est une portée radio en fonction de l'énergie consommée. Elle reste le moyen le plus répandu pour la communication des capteurs [11].

- **L'unité de contrôle d'énergie** : c'est la batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. Cette capacité énergétique limitée au niveau des capteurs représente une contrainte cruciale lors de la conception des différents protocoles pour les réseaux de capteurs. Par ailleurs, les unités d'énergie rechargeables : supportées par des photopiles (cellules solaire) permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique et d'étendre la durée de vie de la batterie [11].

## b/ système d'exploitation

Le système d'exploitation (Operating System ou OS) n'est qu'un ensemble de programmes responsables d'assurer l'exploitation des ressources matérielles d'un dispositif par les applications utilisatrices. Les OS destinés aux réseaux de capteurs sont de petite taille, vu l'espace physiquement limité, mais ils doivent présenter plus de performances en termes de temps d'exécution, occupation de mémoire et en gestion d'énergie. Comme exemple de système d'exploitation le plus répandu pour les réseaux de capteurs : TinyOS.

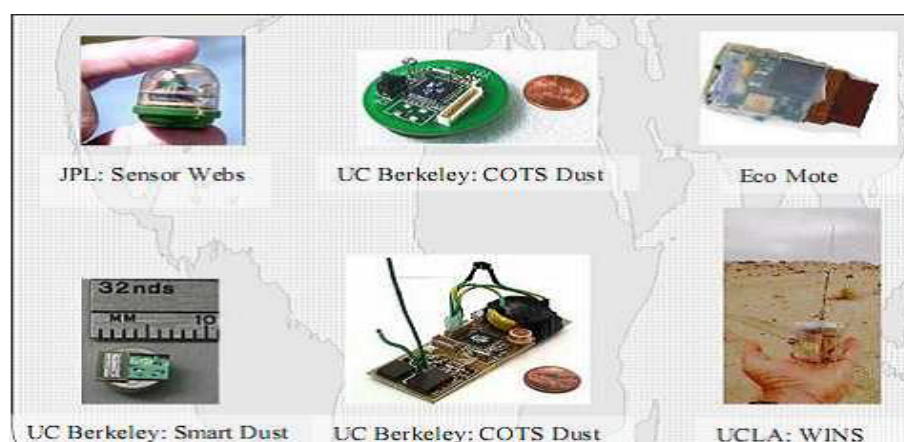


FIG. 1.6 – Exemples de nœuds capteurs (Berkeley Mote)

### 1.3.4 Caractéristiques du réseau de capteurs

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs, nous citon [2] :

- **Energie limitée** : Les RCSF visent la consommation d'énergie puisque l'alimentation de chaque nœud est assurée par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable à cause de l'environnement hostile où il est déployé. De ce fait, la durée de vie d'un RCSF dépend fortement de la conservation d'énergie au niveau de chaque nœud [2].

- **Modèle de communication** : Les nœuds dans les RCSF communiquent selon un paradigme plusieurs-à-un (many to one). En effets, les nœuds capteurs collectent des informations à partir de leur environnement et les envoient toutes vers un seul nœud qui représente le centre de traitement [2].

- **Densité de déploiement** : Elle est plus élevée dans les RCSF que dans les réseaux Ad Hoc. Le nombre de nœuds capteurs peut atteindre des millions de nœuds pour permettre une meilleure granularité de surveillance. De plus, si plusieurs nœuds capteurs se retrouvent dans une région, un nœud défaillant pourra être remplacé par un autre. Cependant, la densité de déploiement donne naissance à des challenges pour la communication entre les nœuds. En effet, elle provoque des collisions ou des endommagements des paquets transmis [2].

- **Absence d'adressage fixe des nœuds** : Les nœuds dans les réseaux sans fil classiques sont identifiés par des adresses IP. Cependant, cette notion n'existe pas dans les RCSF. Ces derniers utilisent un adressage basé sur l'attribut du phénomène capté, on parle donc de l'adressage basé-attribut. En effet, les requêtes des utilisateurs ne sont pas généralement destinées à un seul nœud, mais plutôt, à un ensemble de nœuds identifiés par un attribut. Par exemple, identifier un ensemble de nœuds par " les nœuds qui captent le volume du CO2 dépassant 0,0375 [2].

- **Limitations de ressources physiques** : A cause de la miniaturisation des composants électroniques, les performances des nœuds capteurs sont limitées. Par conséquent, les nœuds capteurs collaborent en traitant partiellement les mesures captées et envoient seulement les résultats à l'utilisateur. Une autre conséquence [10], ces limitations imposent des portées de transmission réduites contraignant les

informations à être relayées de nœud en nœud avant d'atteindre le destinataire. C'est la raison pour laquelle les RCSF adoptent des communications multi-sauts [2].

- **Sécurité** : En plus des problèmes de sécurité rencontrés dans les réseaux Ad Hoc en général, les RCSF rencontrent d'autres handicaps dus à leurs challenges, à savoir l'autonomie et la miniaturisation des capteurs. Cela engendre l'inapplicabilité des mécanismes de défense utilisés dans les réseaux Ad Hoc tout en créant d'autres mécanismes de sécurité pour les RCSF. De plus, l'absence d'une sécurité physique dans l'environnement hostile où ils sont déployés expose les nœuds à un danger qui tend vers la falsification de l'information. En effet, les nœuds capteurs eux-mêmes sont des points de vulnérabilité du réseau car ils peuvent être modifiés, remplacés ou supprimés [2].

### 1.3.5 Domaine d'application des réseaux de capteur sans fil

Le faible coût de production et l'usage de dispositifs miniaturisés et à faible consommation dans les réseaux de capteurs a révélé l'idée de leurs utilisations dans des domaines très variés. Les multiples applications envisagées dans ces réseaux sont souvent classés en cinq familles

- **Applications militaires** :

Comme pour beaucoup d'autres technologies, ce sont historiquement les militaires qui se sont intéressés les premiers aux réseaux de capteurs. Aujourd'hui, ces réseaux sont devenus un axe de recherche très important. Ils peuvent être rapidement déployés pour la surveillance des champs de bataille et utilisés pour fournir d'une manière intelligente l'endroit, le nombre, les mouvements et l'identité des troupes et des véhicules, ainsi que la détection des produits chimiques, biologiques et armes nucléaires [11].

- **Applications environnementales** :

Les réseaux de capteurs peuvent être employés pour détecter et surveiller les changements environnementaux des : forêts, océans, réserves naturels et champs agricoles. Ceci permet l'avertissement de tout risque survenu sur ces zones d'intérêts comme par exemple : le signal de début d'incendie, qui pourrait considérablement augmenter l'efficacité de la lutte contre les feux de forêts [11]. Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou pétrolières, des capteurs déployés peuvent détecter les

fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) et donc alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace.

- ***Applications à la sécurité :***

Pour contrôler la sûreté, l'antisismique et la déformation, les bâtiments et les structures intègrent dans les murs des capteurs sans alimentation électrique ou autres connexions filaires. Les différentes applications des réseaux de capteurs dans la sécurité pourraient diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats [11].

- ***Applications médicales :***

L'utilisation des réseaux de capteurs dans les applications de santé est un potentiel très bénéfique en termes de qualité de vie et surveillance des patients et des médecins à l'intérieur d'un hôpital, pareillement, dans les sites éloignés, telle l'assistance à domicile des personnes âgées. Des capteurs peuvent être avalés ou implantés sous la peau (micro-caméras) offrant la possibilité de collecter les informations des fonctions vitales de l'être humain, réduisant ainsi le retard d'obtention des résultats de diagnostics de certaines maladies et limitant le recours à la chirurgie en transmettant des images de l'intérieur du corps humain [11].

- ***La domotique :***

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs..., donnant ainsi naissance à un autre type d'application dans lequel les réseaux de capteurs émergent : la domotique. Dans ces applications, le réseau de capteurs est déployé dans l'habitation. Le principe est que le réseau forme un environnement, dit environnement pervasif. Son but est de fournir toutes les informations nécessaires aux applications de confort, de sécurité et de maintenance dans l'habitat. Les capteurs sont des capteurs de présence, de son, ils peuvent même être équipés de caméras [11].

### 1.3.6 Classes d'application des RCSF

Dans la gestion des réseaux de capteurs sans fil, on distingue quatre classes d'applications : orientées temps (Time Driven), orientées événement (Event Driven),



orientées requête (Query Driven) et hybride. A partir de cette taxonomie, il est possible d'établir d'autres types de classifications.

- ***Applications Orientées temps " Time Driven "***

Elles représentent les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis. La période d'acquisition peut être de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours, en fonction de l'application envisagée. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe d'application dans un domaine tel que : l'agriculture [12].

- ***Applications orientées événement " Event Driven "***

Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. Un exemple simple est celui de la surveillance des faux dans les forêts ou un capteur envoie des alertes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Au départ, cette classe a été utilisée spécialement à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille [12]. Actuellement elle est utilisée dans d'autres domaines comme la médecine (contrôle médical des patients), la surveillance d'édifices (ponts, barrages, etc.).

- ***Applications orientées requêtes "Query Driven "***

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires [12].

- ***Applications hybrides***

Ce type d'application met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance et un réseau de collecte de données par événements, etc [12].

### 1.3.7 Communication dans les réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds doivent bien réagir avec l'environnement où ils sont placés. Ainsi, ils doivent permettre une communication multi sauts pour

les données qui circulent dans la zone de capture. Pour cela, un modèle de communication est proposé par Ian et al [13] dont le rôle principal est la standardisation de la communication entre les participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles. Ce modèle (détaillé dans 1.3.7.1) combine l'énergie et le routage, intègre les données avec les protocoles réseaux et promeut une communication efficace entre les différents nœuds à travers un medium sans fil.

### 1.3.7.1 A/Pile protocolaire (modèle en couches)

Par analogie au modèle OSI (Open Système Interconnexion) des réseaux filaires, le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI. Comme la communication n'est pas le seul souci dans les réseaux de capteurs, il y a d'autres critères très importants qu'il faut en tenir compte. De ce fait, d'autres couches supplémentaires sont ajoutées pour gérer l'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches.

Le rôle et les caractéristiques des couches : application, transport, réseau, liaison de données, physique et les niveaux intégrés : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche (voir la figure 1.7 ) sont résumés dans le paragraphe suivant.

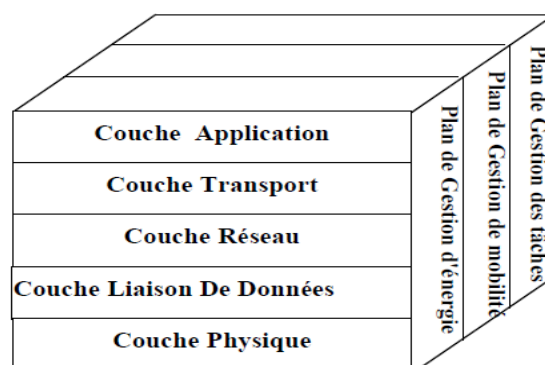


FIG. 1.7 – Modèle en couches (pile protocolaire) d'une architecture de réseau de capteurs [14].

#### • *Couche application*

Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et implémentées sur cette couche. Elle fournit des mécanismes pour permettre

à l'utilisateur d'interagir avec le réseau en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues [14].

### • *Couche transport*

Cette couche constitue une interface entre la couche application et la couche réseau. Elle est responsable : du transport de données, leur découpage en paquets, contrôle de flux, conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission [14].

### • *Couche réseau*

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont dispersés à forte densité pour observer un phénomène dans une région. Par conséquent, ils sont très proches les uns des autres. Pour assurer la propagation du signal sans effets de dégradation, les réseaux de capteurs utilisent une communication multi sauts. De plus, les nœuds doivent consommer moins d'énergie pour acheminer les données capturées dans le réseau au nœud puits, ce qui rend l'utilisation des protocoles de communication traditionnels des réseaux Ad hoc impraticables [14]. Par ailleurs d'autres caractéristiques peuvent être citées afin d'illustrer le besoin de nouveaux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs :

- il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global vu le grand nombre de nœuds capteurs.
- les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées par de multiples sources à un nœud puits particulier.
- Les multiples capteurs peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance des données captées due à la forte densité de déploiement).
- les capteurs exigent une gestion soigneuse des ressources disponibles à savoir : la puissance de transmission, énergie de la batterie, ainsi que la puissance de traitement et stockage.

### • *Couche liaison de données*

La couche liaison est à la charge du multiplexage de données, détection des trames, la gestion de l'accès au support de communication et le contrôle d'erreurs. Elle assure la fiabilité de la communication point à point et multipoint. Cependant, les protocoles MAC (Media Access Control) conventionnels ne sont pas directement

applicables dans les réseaux de capteurs [14]. Cette couche, exige l'utilisation de protocoles qui doivent être capables : de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins et de minimiser les retransmissions.

- ***Couche physique***

Dans cette couche les besoins d'une modulation simple et robuste à motiver l'utilisation des techniques de transmission et de réception de données afin d'assurer la sélection des fréquences, la génération des porteuses et le cryptage des différentes données. De manière générale, le choix d'un bon schéma de modulation est critique et dépend du système utilisé [14].

- **Les niveaux intégrés dans la pile protocolaire**

Trois couches supplémentaires sont intégrées dans la pile protocolaire : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche.

- 1. Plan de gestion d'énergie :**

Cette partie gère la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Généralement un capteur ne nécessite qu'une source énergétique limitée ( $\approx 0.5$  Ah, 1.2 V). Comme la vie du nœud a une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie, il doit par conséquent contrôler et minimiser sa consommation d'énergie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur et se met en mode sommeil afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie atteint un seuil bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte pour les informer qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée à la capture [15].

- 2. Plan de gestion de mobilité :**

Il permet la détection et l'enregistrement des mouvements des nœuds capteurs afin de maintenir des informations sur leurs localisations et d'entretenir continuellement une route vers l'utilisateur final. Dans plusieurs cas les nœuds capteurs peuvent être mobiles suite à une configuration d'une nouvelle topologie ou bien par un changement d'emplacement désiré par l'utilisateur. Le système de gestion de mobilité doit être capable de commander les nœuds pour réaliser les mouvements nécessaires[15].

- 3. Plan de gestion de tâche :**

Ordonnance et balance les différentes tâches de capture de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent

la tâche de capture en même temps ; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie [15].

### • Types de communication dans les réseaux de capteurs sans fil

Le but d'un réseau de capteurs sans fil est la surveillance d'un environnement physique et la fourniture des informations capturées. Chaque nœud est équipé d'un ou plusieurs capteurs, par lesquels les données sont capturées et transportées à travers d'autres nœuds du réseau à la destination de données.

En général, 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 du réseau (nœuds de relais). Les données capturées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi sauts. Comme illustré dans la figure 1.8, cette organisation logique implique quatre types de communications :

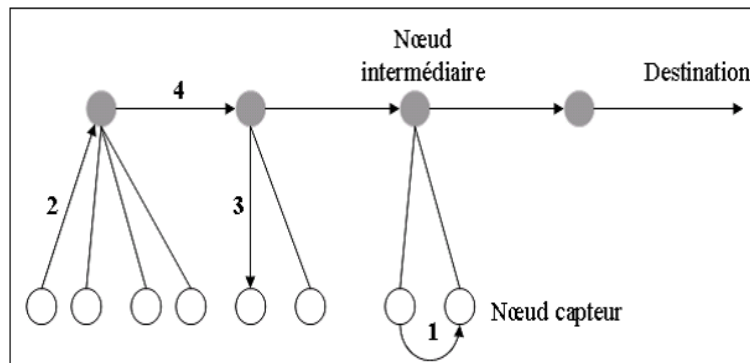


FIG. 1.8 – Types de communication dans un RCSF.

#### - *La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur :*

ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clusterisation (c'est l'organisation du réseau en structure cellulaire) [16].

#### - *La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire :*

les données capturées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast [17].

**- La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur :**

les requêtes et la signalisation des messages sont souvent multicast. Elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires pour atteindre un sous-ensemble des nœuds immédiatement (communication directe).

**- La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire :**

la communication entre ces nœuds est la plupart du temps unicast [15].

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

### 1.3.8 Facteurs de conception des réseaux de capteurs sans fil

Nous allons introduire les facteurs les plus importants à prendre en compte dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil. Ces facteurs sont un guide dans la conception et l'implémentation des protocoles des différentes couches protocolaires propres aux réseaux de capteurs sans fil.

**A/ La tolérance aux fautes :**

La tolérance aux fautes est la capacité d'un réseau à maintenir son bon fonctionnement sans aucune interruption. Les interruptions sont causées par les pannes de nœuds. Dans un réseau de capteurs sans fil certains capteurs peuvent tomber en panne ou être bloqués du fait de l'épuisement de leurs batteries ou à cause d'un facteur environnemental. Les pannes des nœuds capteurs ne doivent pas affecter le bon fonctionnement du réseau [18].

**B/ La scalabilité**

Le nombre de nœuds d'un réseau dépend de l'application à laquelle est destiné ce réseau. Il peut atteindre plusieurs centaines ou plusieurs milliers. Le nombre de nœud peut atteindre les centaines dans une région du champ de captage où cette dernière peut avoir une surface de 10 m<sup>2</sup> [18].

### ***C/ Le coût de production***

L'intérêt de créer une nouvelle technologie est de faciliter la vie quotidienne des utilisateurs et de permettre de gagner du temps et de l'argent. Les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs. Par conséquent, le prix d'un capteur doit être réduit afin de concevoir un réseau de capteurs abordable [18].

### ***D/ Les contraintes matérielles***

Un capteur est composé de quatre unités de base et de composants optionnels qui dépendent de l'application. Certaines techniques de routage et tâches de perception nécessitent des informations sur la localisation avec une grande exactitude. Par conséquent un capteur doit être doté d'un système de localisation. Un mobilisateur peut être nécessaire pour déplacer des nœuds afin d'effectuer certaines tâches. Toutes ces sous unités occupent de la place dans un dispositif dont la taille peut être inférieure à 1 cm<sup>3</sup> [18].

### ***E/ La topologie***

Des centaines voire des milliers de nœuds peuvent être déployés dans un champ de captage. Les capteurs sont distants d'une dizaine de pieds les uns des autres. La densité des nœuds peut atteindre 20 nœuds/m<sup>2</sup>. Le déploiement d'un grand nombre de nœuds exige le contrôle et le maintien de la topologie [18].

### ***F/ Le média de transmission***

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont interconnectés à travers une interface de communication sans fil : une liaison radio, infrarouge ou optique. Pour réaliser les différentes opérations d'un réseau, le media de transmission choisi doit être fiable. La plupart des réseaux de capteurs utilisent les radios fréquences pour communiquer. Les fréquences radio sont omnidirectionnelles. Il existe des bandes de fréquences internationales à partir desquelles, les réseaux de capteurs allouent leurs bandes, appelées Bandes ISM (Industrial Scientific Medical Bands) [18].

### ***g/ La consommation d'énergie***

Un capteur est un dispositif micro-électronique équipé d'une source d'énergie limitée. Dans la majorité des applications des réseaux de capteurs sans fil la recharge de la batterie est impossible. Par conséquent la durée de vie d'un capteur est largement liée à celle de sa batterie [18].

## 1.4 Conclusion

Un réseau de capteurs est constitué de plusieurs nœuds capteurs chargés de collecter des informations sur l'environnement dans lequel ils sont déployés et de les transmettre vers un site donné. Il se caractérise par une grande flexibilité et tolérance aux fautes, un prix réduit et des moyens rapides de déploiement du réseau. Grâce à ces caractéristiques le champ d'application des réseaux de capteurs s'est étendu pour contenir la plupart des domaines tel que l'industrie, la recherche, l'environnement, ou la médecine. Il paraît évident qu'ils auront de nouveaux effets dans notre vie de tous les jours et peuvent changer considérablement notre vision du monde.

Cependant, la réalisation des réseaux de capteurs doit satisfaire quelques contraintes parmi lesquelles on peut citer : la consommation d'énergie, le changement de topologie, la densité importante des réseaux... Ces contraintes sont à double tranchant. En effet, elles offrent des possibilités énormes de développement pour les différents domaines d'application et permettent sûrement de satisfaire les plus grands projets. En revanche, elles rendent la mise en place d'une application de réseau de capteur un véritable défi.

Au cours de chapitre ci-dessous nous allons vous montrer le routage dans les RCSFs.



# Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

## 2.1 Introduction

Le routage est défini comme une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau, selon les types de réseau, les données sont envoyées par paquets.

La notion de routage est très importante dans les réseaux de capteurs. Les techniques de routage ad hoc usuelles ne s'adaptent pas, en général, aux réseaux de capteurs. Cela est conséquences des différences entre ces deux types de réseaux. Dans les réseaux de capteurs, le routage est plus important en tant que son succès et efficacité pour conserver l'énergie et ressources dans le réseau entier.

Ce chapitre présente un état de l'art sur les protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs. Dans un premier temps, nous présenterons le routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs, nous ferons par la suite un recueil des différents classifications des protocoles : selon la structure du réseau, l'initiateur de communication, le fonctionnement des protocoles.

Enfin nous terminons ce chapitre par une conclusion.

## 2.2 Routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs

En général, dans les réseaux de capteurs, les protocoles de routage se basent sur l'une des techniques suivant pour l'optimisation de l'énergie. Cette optimisation se fait par le choix de la route à consommation d'énergie minimale

Au moment du routage, le choix de la route à consommation d'énergie minimale peut suivre quatre approches, afin de décrire chacune d'elles nous utilisons la figure 9 où le nœud T sera considéré comme nœud capteur source qui surveille le phénomène. Chaque nœud intermédiaire est caractérisé par la valeur PA qui désigne l'énergie disponible au niveau du nœud, de la même manière, chaque liaison entre deux nœuds est caractérisée par l'énergie  $\alpha$  nécessaire pour transmettre un paquet de données entre les deux extrémités

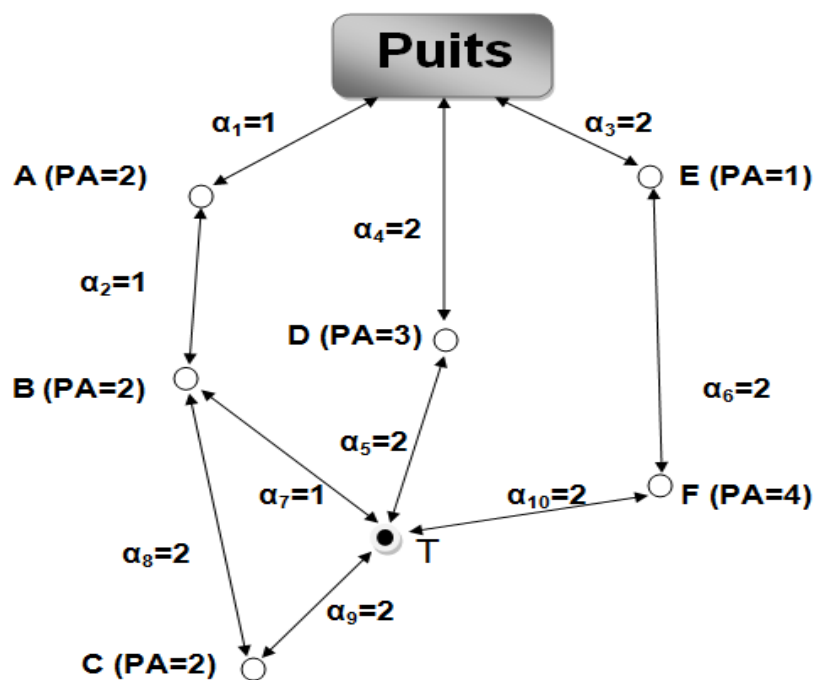


FIG. 2.1 – Route efficaces en consommation d'énergie.

Pour transmettre un paquet du nœud T au nœud puits, 4 routes sont possibles :

- o Route 1 : Puits-A-B-T, avec l'énergie totale disponible  $PA = 4$  et l'énergie totale nécessaire  $a=3$ ,

- o Route 2 : Puits-A-B-C-T, avec l'énergie totale disponible  $PA = 6$  et l'énergie totale nécessaire  $a=6$
- o Route 3 : Puits-D-T, avec l'énergie totale disponible  $PA = 3$  et l'énergie totale nécessaire  $a=4$
- o Route 4 : Puits-E-F-T, avec l'énergie totale disponible  $PA = 5$  et l'énergie totale nécessaire  $a=6$

### 2.2.1 Route à énergie disponible maximale

La première approche pour le choix des routes efficaces en consommation d'énergie consiste à prendre celle qui contient les nœuds possédant, ensemble, un maximum d'énergie totale disponible. Cette quantité est égale à la somme des énergies  $PA$  de chaque nœud appartenant à cette route.

En se basant sur cette approche, la route 2 est sélectionnée dans l'exemple de la figure 9, mais nous remarquons, tout de suite, que cette route contient les nœuds de la route 1 en plus du nœud C, ceci dit, cette route ne peut être la plus efficace en consommation d'énergie malgré qu'elle possède le maximum d'énergie totale disponible.

Par conséquent, il est important, dans un algorithme de routage, de ne jamais considérer comme alternatives les routes qui peuvent être dérivées par extension de celles allant du nœud capteur vers le nœud puits. L'élimination de la route 2 mène alors à choisir la route 4 comme route efficace en consommation d'énergie suivant la première approche [12].

### 2.2.2 Route à énergie de transmission minimale

Cette approche consiste à choisir la route qui consomme le minimum d'énergie pour transmettre un paquet entre le nœud capteur et le nœud puits. Suivant l'exemple, la route 1 est celle qui consomme le minimum d'énergie [17].

### 2.2.3 Route à nombre de sauts minimum

La route sélectionnée est celle qui traverse un nombre minimum de nœuds intermédiaires pour atteindre le nœud puits. Dans le cas de l'exemple de la figure 2.1, la route 4 est celle qui est la plus efficace suivant ce schéma de sélection.

Il est à noter que, les deux approches de " routes à sauts minimum " et " route à énergie de transmission minimale " sélectionnent les mêmes chemins quand les

énergies de transmission  $\alpha$  sont identiques [12].

#### 2.2.4 Route à nœud ayant le maximum des minimums des énergies disponibles

Cette approche favorise la route dans la quelle l'énergie disponible minimum traversée est plus grande que toutes les autres énergies disponible minimums des autres routes. Dans la figure 2.1, la route 3 est celle qui est favorable pour cette approche, la route 1 vient après.

La stratégie de ce schéma de sélection évite l'utilisation du nœud qui a une faible énergie disponible pour lui assurer une durée de vie plus longue [12].

### 2.3 Protocoles de routage pour un réseau de capteurs sans fil

Les protocoles de routages développés pour les réseaux de capteurs sans fil peuvent être classés en trois catégories : protocole à plat, protocole hiérarchique et protocole basés sur la localisation géographique.

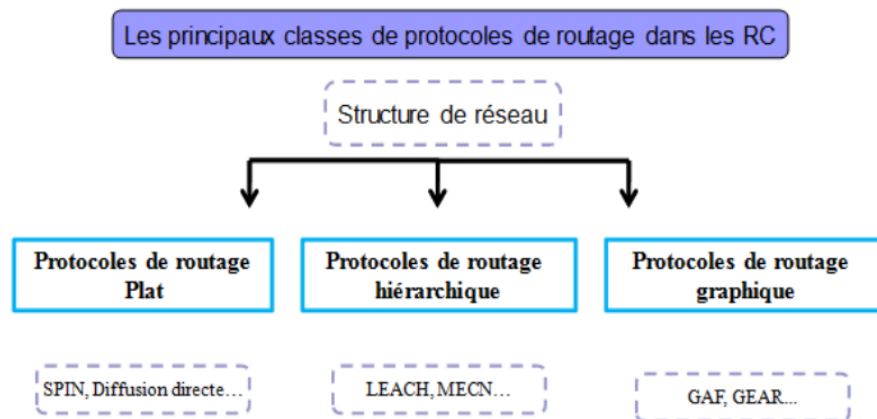


FIG. 2.2 – Classes de protocoles du routage.

#### 2.3.1 Routage à plat

Dans un réseau à structure plate, tous les nœuds jouent le même rôle et coopèrent ensemble pour réaliser la tâche du routage. En raison du grand nombre de nœuds

capteurs, il n'est pas faisable d'assigner un identifiant global à chaque nœud (tel que l'adressage IP), due à la difficulté d'obtention et de gestion d'adresses qui nécessitent généralement une étape de configuration qui peut être complexe. De plus, étant donné la nature des applications des réseaux de capteurs, où l'utilisateur ne s'intéresse pas à communiquer avec un nœud particulier dans le réseau, mais se concentre plutôt sur sa donnée. Dans ce cas la donnée est plus importante que le nœud lui-même et toutes les communications sont identifiées par leurs données. Il est donc nécessaire de concevoir une approche de routage pour répondre à ces exigences. D'où l'apparition des protocoles de routage centrés-données (Data-Centric)[18]. Dans ce type de protocoles, le routage ne se fait pas en fonction d'une adresse de destination, mais suivant les données disponibles au niveau des capteurs.

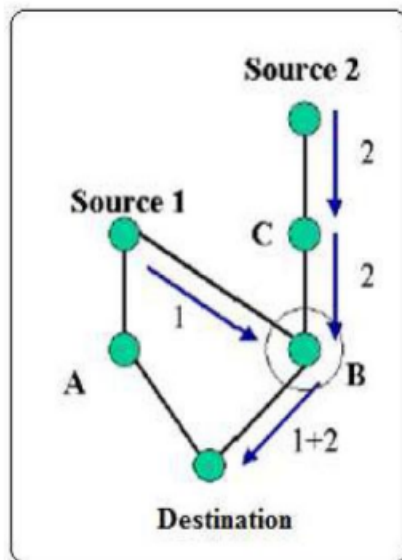


FIG. 2.3 – Routage data-centric

Comme montre l'exemple de data-centric dans la figure, les données provenant des deux sources sont agrégées au nœud B. ensuite, la donnée combinée (1+2) est envoyée de B vers la destination.

### A) Exemple de protocoles de cette famille

Parmi les protocoles publiés dans la littérature selon le routage à plat et centré données on peut citer :

- sensor protocols for information via negotiation (SPIN),
- Direct Diffusion ou Direct Diffusion (DD),
- Rumor Routing,
- Directed Diffusion (EAR),
- Secure routing (SCR).

### B) Avantages de routage à plat

✓ Passage à l'échelle (scalability) : un réseau avec une topologie plate qui supporte en général le passage à l'échelle du fait que tous les nœuds du réseau ont le même rôle et participent similairement au routage des données capturées. Ainsi, les nœuds ont besoin de connaître seulement leurs voisins.

✓ Simplicité : les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, puisqu'il est possible d'établir le réseau sans overhead ainsi que nous n'avons aucun besoin d'algorithmes complexes pour faire le choix d'un cluster-head .

✓ L'agrégation des données s'effectue par les nœuds capteurs en éliminant les redondances sur les messages qui proviennent des nœuds voisins.

✓ Les liens sont formés à la volée sans synchronisation.

### C) Inconvénients de routage à plat

✓ Point 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.

## 2.3.2 Routage hiérarchique

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 (clusters), avec dans chaque groupe un leader (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 [19].

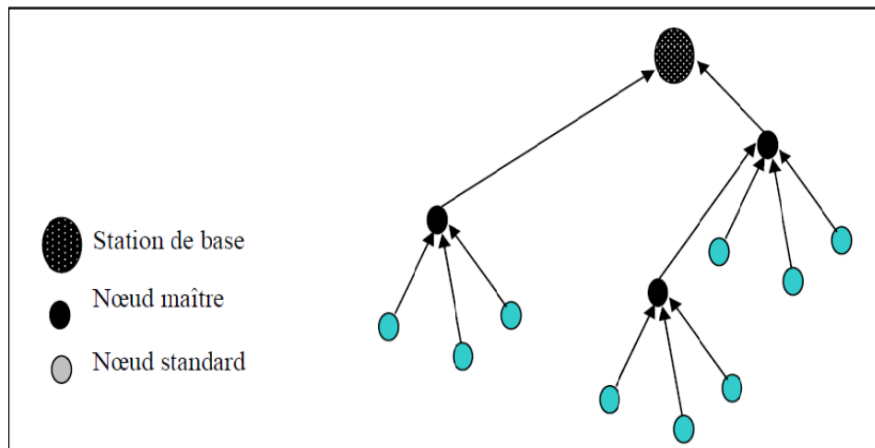


FIG. 2.4 – Routage hiérarchique

Dans le reste de cette section, nous donnerons quelques protocoles de cette famille. Et nous mettrons l'accent sur les avantages et les inconvénients de cette structure.

### A) Exemple de protocoles de cette famille

- Low Energy Adaptation Clustering Hierarchy (LEACH)
- Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN)
- The Adaptive Periodic TEEN (APTEEN)
- Self-organizing Protocol (SOP)
- Virtual Grid Architecture Routing (VGAR)

### B) Avantages de routage hiérarchique

✓ L'avantage majeur de routage hiérarchique est la réduction de la complexité

✓ Agrégation : les données qui sont collectées à partir d'un ensemble des nœuds d'un cluster peuvent être fusionnées par un clusterhead et par la suite envoyées vers le puits.

✓ Points chauds (Hotspots) : l'inconvénient des Hotspots rencontrés dans le routage plat est résolu par les clusterheads qui sont les seuls à envoyer les données vers le puits. le changement de rôle des nœuds entre clusterhead/membre d'un cluster augmente la durée de vie du réseau.

✓ Dans une application où la transmission est initiée par les capteurs sources, une architecture hiérarchique du réseau est préférable, pour effectuer des opérations d'agrégation au niveau des clusterheads

### C) Inconvénients de routage hiérarchique

- ✓ Si les cluster-head ne changent pas régulièrement, ils consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau et le réseau va être partitionné
- ✓ Plusieurs protocoles exigent que les nœuds clusterheads aient des ressources énergétiques plus élevées que les autres nœuds dans le réseau
- ✓ Si les nœuds clusterheads ont la même capacité que les autres nœuds dans le réseau, la méthode utilisée pour faire le routage et le choix des clusterheads doit prendre en considération la contrainte de consommation d'énergie d'une manière équitable

### 2.3.3 Routage géographique

Dans certaines applications des réseaux de capteurs, un système de localisation des nœuds capteurs devient nécessaire pour calculer la distance entre les nœuds, afin d'estimer la consommation d'énergie lors des différentes émissions. En effet, les informations concernant l'emplacement des nœuds capteurs, peuvent être utilisées dans le routage des données, pour minimiser la consommation d'énergie et maximiser ainsi la durée de vie du réseau, par exemple, si la région de captage est connue par les coordonnées des nœuds capteurs, alors la requête sera diffusée uniquement vers cette région, par conséquent, le nombre de transmissions sera réduit de manière significative [20].

#### A) Exemple de protocoles de cette famille

- Minimum Energy Communication Network (MECN)
- the Small Minimum Energy Communication Network (SMECN)
- Geographic Adaptive Fidelity (GAF)
- Geographic and Energy-Aware Routing (GEAR)
- Anchor Location Service (ALS)

#### B) Avantages de routage géographique

- ✓ Facilité de contrôle de la topologie du réseau et la puissance de transmission des capteurs, par l'application des systèmes de positionnement, tel que le Global Positioning System (GPS).
- ✓ Ce type de routage est bien adapté à des applications orientées requêtes, dont le déploiement des nœuds est généralement aléatoire.
- ✓ La connaissance des coordonnées des nœuds, permet un calcul facile des routes énergétiquement optimales.
- ✓ Ce type de routage minimise la consommation d'énergie car il élimine les



transmissions inutiles, en envoyant les requêtes de la station de base vers des régions bien précises.

### **C) Inconvénients de routage géographique**

- ✓ Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- ✓ Le calcul des positions des nœuds exige une administration centralisée.
- ✓ 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.

## **2.4 Protocoles basés sur l'initiateur de communication**

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

### **2.4.1 Communication lancée par la source**

Dans un protocole où la communication est initiée par un nœud source : les nœuds envoient des données à la station de base quand ils détectent une variation sensible des paramètres à surveiller. Ces protocoles utilisent des modèles de livraison de donnée dirigés par les événements ou dirigés par le temps (périodiques). Soit la donnée est envoyée à intervalle de temps régulier ou alors elle est envoyée quand les nœuds capturent une certaine valeur (détection d'un événement)[17].

#### **A) Avantages**

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

#### **B) 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 QDS (qualité de service) doivent en général être respectées.

### 2.4.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles où la communication est initiée par les destinations, utilisent un modèle de livraison de donnée basé sur les requêtes. Les nœuds sources répondent aux requêtes envoyées par la station de base. Il y a un surcoût dans ce type de protocoles, puisque les requêtes sont d'abord diffusées dans tout le réseau. Donc, à chaque fois qu'il y a une requête, il y a un flooding dans tout le réseau (inondation de tout le réseau) [17].

#### A) Avantages

✓ L'envoi des requêtes décrivent les données requises par la station de base élimine les transmissions inutiles.

#### B) 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 Protocoles basés sur le fonctionnement des protocoles

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Quality of Service "QoS" based routing), routage basé sur la négociation (Negociation based routing), routage basé sur des multi chemins (Multi-path based routing), et routage basé sur le flux de données dans le réseau (Network flow based routing).

### 2.5.1 Routage basé sur la qualité de service

N'importe quel protocole de routage selon cette famille tend à satisfaire quelques métriques QoS comme par exemple : le délai d'acheminement de bout en bout, la bande passante et le taux d'erreurs, afin de réaliser un routage équilibré en termes de consommation d'énergie et délivrance de données en temps réel. Pour cela, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité des données [11]. Nous discutons quelques exemples de ces protocoles dans le paragraphe suivant.

#### A) Exemple de protocoles de cette famille

- Sequential Assignment Routing : SAR

- A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks : SPEED

### **B) Avantages**

✓ La prise en compte des délais de transmissions rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications surveillance (centre 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 nœud puits.

### **C) Inconvénients**

✓ Cette approche ne répond pas en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.

## **2.5.2 Routage basé sur la négociation de données**

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. Avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en utilisant des messages de négociation afin d'éliminer la transmission des données redondantes[11]. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises ce qui élimine la redondance des données et économise l'énergie

### **A) Exemple de protocoles de cette famille**

✓ Sensor Protocol for Information Negotiation : SPIN

### **B) Avantages**

✓ Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises.

✓ La négociation entre les nœuds leur permet de prendre des décisions adéquates suivant leurs ressources énergétiques disponibles.

### **C) Inconvénients**

✓ L'échange de messages de contrôle entre les nœuds produit une congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.

✓ Le scénario de négociation entre les nœuds produit un retard pour délivrer les données à la station de base.

### 2.5.3 Routage multi chemins

Au lieu d'utiliser un seul chemin, les protocoles maintiennent plusieurs routes afin d'augmenter les performances du réseau. La résistance d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Cela peut être garanti en maintenant plusieurs chemins ne consommant pas beaucoup d'énergie et en laissant actifs par l'envoi de messages périodiques [19].

#### A) Exemple de protocoles de cette famille

- Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks : EAR

#### B) Avantages

✓ Un mécanisme d'équilibrage de charge peut être utilisé pour la répartition trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des nœuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens.

✓ Permet de maintenir plusieurs chemins consommant moins d'énergie pour router les données vers les destinations.

✓ L'augmentation de la fiabilité et de la robustesse par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination.

#### C) Inconvénients

✓ Le risque de perte des paquets augmente dans le cas où ces derniers sont envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.

✓ La perte additionnelle d'énergie, due à l'envoi des messages périodiques pour maintenir les routes alternatives.

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

Dans ce type de routage, l'établissement de routes est modélisé et résolu comme un problème de demande de flux de données où le flux représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds [20].

#### A) Avantages

✓ L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.

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

#### B) Inconvénients

✓ Cette approche est valable pour les RCSFs à des topologies spécifiques (par exemple : un seul nœud origine).

- ✓ Des informations sur la topologie du réseau sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grand échelle
- ✓ La majorité des algorithmes de cette approche supposent que le taux de génération des données est connu ou bien constant.

## 2.6 Conclusion

Le routage dans les RCSFs forme un axe de recherche intéressant, avec un ensemble limité, mais en pleine croissance de résultats des recherches. Cette croissance fortement liée à deux facteurs :

- ★ Les capteurs sont des véritables systèmes embarqués et donc sont conçus pour les applications spécifiques,
- ★ L'expansion du champ de domaine d'application des RCSFs (voir chapitre I).

Les protocoles de routage proposés pour les RCSFs sont donc nombreux, mais ils ont tous un objectif commun : Assurer l'acheminement des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant d'étendre la durée du réseau. Cela nécessite la prise en compte des caractéristiques des RCSFs et des exigences des applications pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude bibliographie sur les différentes classes de routage proposés pour les RCSFs, vu leur avantage et leur inconvénient.

Dans le chapitre suivant on a pour but de définir le routage hiérarchique dans les RSCSF puis on va vous présenter le protocole leach et ses différentes variantes.

# Routage hiérarchique dans les RCSFs : LEACH et ses variantes

## 3.1 Introduction

Lorsque la taille des réseaux devient de plus en plus importante, sa gestion devient plus difficile. Le protocole de routage à plat fonctionne bien quand le réseau ne comprend pas un grand nombre de nœuds. La structuration d'un réseau est l'un des outils principaux pour sauvegarder l'énergie dans chaque nœud du réseau, ce qui aboutit à prolonger la durée de vie du système. Une des structures les plus connues est la hiérarchie. La technique de hiérarchisation (comme on a vu dans le chapitre 2) sert à partitionner le réseau en sous-ensembles afin de faciliter la gestion du réseau surtout le routage, qui se réalise à plusieurs niveaux. Dans ce type de protocoles, la vue du réseau devient locale ; des nœuds spéciaux peuvent avoir des rôles supplémentaires.

Dans ce chapitre, nous définissons le routage hiérarchique dans les RCSFs, ensuite nous donnons les approches de clustérisation et leur avantages , enfin nous décrivons le protocole LEACH et ses différentes variantes.

## 3.2 Définition

Le routage hiérarchique ou basé-groupe (cluster-based) est originalement proposé pour les réseaux filères et ensuite utilisé pour les réseaux de capteurs. Dans une architecture hiérarchique, des nœuds ayant plus d'énergie sont utilisés pour traiter et transmettre les informations tandis que les nœuds de faible énergie sont utilisés pour capturer à la proximité de la cible. C'est-à-dire, construire des groupes de nœuds et leur associer spécialement les tâches à exécuter. Le routage hiérarchique se fait principalement en deux niveaux : dans l'un les représentants des groupes (cluster-heads) sont sélectionnés, et dans l'autre le routage proprement dit est procédé [21].

## 3.3 Approche de clustérisations pour les RCSFs

Afin d'avoir une topologie plus stable et plus scalable pour le réseau de capteurs, de nombreuses solutions basées sur le clustering ont été proposées dans la littérature. En outre, ces protocoles permettent aussi la réutilisation spatiale de la bande passante ainsi que son contrôle.

Ainsi, plusieurs classifications ont été apportées à ces protocoles. Dans cette section, cinq grandes familles vont être exposées : les protocoles hiérarchiques à temps de convergence constant et variable, les protocoles heuristique et pondérés et enfin les protocoles émergents.

### 3.3.1 Protocoles hiérarchiques à temps de convergence constant

La formation des clusters et le choix de leurs chefs dans ce type de protocoles s'achèvent en un temps de convergence constant. Généralement, la construction des groupes et l'élection des CHs sont basées sur une probabilité en fonction du nombre de nœuds dans le réseau, nombre de fois que le nœud a été choisi CH, la taille du cluster, l'énergie résiduelle locale des capteurs et enfin sur la proximité de ces derniers du CH à élire [22].

#### **Exemple :**

- LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy,
- A Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering Approach For Ad-hoc,
- EECS : Energy Efficient Clustering Scheme in WSN.

### 3.3.2 Protocole hiérarchique à temps de convergence variable

Le temps est un facteur important dans la convergence des protocoles de clustering. Certains de ces protocoles tels que RCC [23] et CLUBS [24] ont  $O(n)$  comme temps de convergence, où  $n$  représente le nombre de capteurs dans le réseau. Il est, donc, plus pratique de mettre en œuvre ce type de protocole pour les réseaux de capteurs de petite ou moyenne taille car ce temps de convergence variable va permettre à ces protocoles plus de contrôle pour les propriétés de clusters que ceux à temps de convergence constant.

**Exemple :**

- Energy Efficient Hierarchical Clustering : EEHC,
- Random Competition based Clustering : RCC,
- Algorithm For Group Formation In An Amorphous Computer : CLUBS.

### 3.3.3 Protocoles hiérarchiques heuristiques

La sélection d'un ensemble optimal de clusters est équivalente au problème d'optimisation qui est un problème NP-complet. Plusieurs protocoles de clustering proposés dans la littérature sont basés sur différentes heuristiques. Une heuristique est un algorithme de résolution ne fournissant pas nécessairement une solution optimale pour un problème d'optimisation donné. Souvent, un algorithme heuristique a les objectifs suivants : trouver un algorithme avec un temps raisonnable (le temps favorable pour la construction de clusters) et essayer aussi de trouver la solution optimale (essayer de fournir la solution la plus proche de l'optimum).

La plupart des protocoles heuristiques ont une complexité temporelle de  $O(n)$ , où  $n$  est le nombre total de nœuds. Ces protocoles permettent d'avoir des performances judicieuses. En plus, ils ne sont pas basés sur des métriques particulières car les CHs sont choisis selon différentes contraintes [25].

**Exemple :**

- Linked Cluster Algorithm : LCA2,
- Highest Connectivity Cluster Algorithm,
- Max-Min-D Cluster.



### 3.3.4 Protocoles hiérarchiques pondérés

Plutôt que d'utiliser une seule métrique pour élire les CHs, certains protocoles de clustering proposés dans la littérature utilisent une somme pondérée de plusieurs paramètres pour l'élection de CHs. Ces protocoles associent un poids à chaque nœud. Ce poids est représenté par une somme pondérée des différentes métriques impliquées dans son calcul comme montré dans cette équation :

$$Poids(u) = \sum_{i=1}^K \alpha_i * p_i \quad avec \quad \sum_{i=1}^K \alpha_i = 1$$

où :

$\alpha_i$  représente le coefficient de pondération (le degré d'implication de la métrique) et  $P_i$  la Valeur de la métrique. Le coefficient de pondération de chaque métrique dépend de l'application et reflète son degré d'implication dans le calcul du poids. Par exemple, dans les réseaux de capteurs où l'énergie est une ressource précieuse, il est nécessaire de faire associer à la métrique d'énergie résiduelle un coefficient de pondération très élevé [25].

**Exemple :**

- Weighted Clustering Algorithm : WCA,
- Distributed Clustering Algorithm : DCA.

### 3.3.5 Protocoles hiérarchiques émergents

Un protocole émergent est n'importe quel calcul qui réalise formellement ou atteint stochastiquement des effets globaux prévisibles en communiquant seulement avec un nombre limité de voisins immédiats et sans l'utilisation de contrôle centralisé ou de visibilité globale. Par conséquent, un protocole émergent pour un réseau de capteurs est un protocole dans lequel la propriété globale désirée, ni explicitement codée dans le protocole ni organisée par une autorité centrale, mais elle émerge en raison de l'interaction et de la rétroaction locales répétée entre les nœuds [25].

**Exemple :**

- ACE : An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation

Le tableau suivant regroupe les cinq classes et associe à chacune d'elles un ou plusieurs protocoles lui appartenant.

Les protocoles hiérarchique à temps de convergence constant	Les protocoles hiérarchique à temps de convergence variable	Les protocoles heuristiques	Les protocoles pondérés	les protocoles émergents
-LEACH -HEED  -EECS  -EEUC	-EEUC - RCC  -Clubs  -Hierarchical contro clus-tring	-LCA2 -Max-Min-D cluser -Highest Connectivity Cluster	-WCA  -DCA	-ACE

TAB. 3.1 – Approches de Clustérisations dans les RCSFs .

### 3.4 Avantages de l'approche de clustérisation

Le mécanisme de clustering permet de [26][27] :

- Faciliter le partage des ressources et /ou la synchronisation au sein d'un cluster.
- Optimiser l'utilisation de la bande passante en limitant les interactions inter-clusters et évitant les échanges superflus des messages avec la station de base ; alléger le flux de communication dans le réseau.
- Réduire la taille des tables de routage stockées au niveau des nœuds en localisant le chemin, car la mise en place des routes se fait seulement au niveau des cluster-heads.
- Agrégation des 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 la station de base ce qui permet la réduction du nombre de paquets échangés.
- Stabiliser la topologie au niveau des nœuds et donc minimiser les frais de sa maintenance. Un nœud ne s'inquiète que du choix du cluster-head auquel il va être relié. Par conséquent il n'est pas affecté par les changements au niveau supérieur.
- Implémenter des mécanismes par les CHs afin d'augmenter la durée de vie de la batterie, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau. Par exemple, le

cluster-head programme les activités dans le cluster de sorte que les nœuds puissent dormir le plus de temps possible et donc diminuer le taux de communication ainsi que le taux de collisions pour y accéder au canal de communication.

## 3.5 Protocole LEACH et ses variantes

Comme tout autre protocole de routage, LEACH possède ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients

### 3.5.1 LAECH (Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est l'un des premiers protocoles de routage hiérarchique proposés pour les réseaux de capteurs[28].

Dans LEACH, les nœuds s'organisent en clusters. Dans chaque cluster, un nœud agit en tant que cluster-head et tous les autres transmettent leurs données à ce dernier. Par ailleurs, chaque cluster-head qui reçoit les données transmises par les membres du groupe, effectue des agrégations sur ces données, et envoie les résultats aux puits. Par conséquent, un cluster-head doit posséder plus d'énergie que les nœuds membres. De ce fait, LEACH utilise la rotation aléatoire de la position du cluster-head entre l'ensemble des capteurs du cluster, pour mieux répartir la consommation d'énergie entre tous les nœuds du cluster.

Le fonctionnement de LEACH est divisé en itérations. Chaque itération est composée de deux phases. La première phase d'installation consiste à organiser les clusters.

Dans la deuxième phase, appelée état-stable, les données des nœuds capteurs sont transférées au cluster-head et ensuite vers la station de base [19].

- **Avantages :**

- Puisque chaque nœud transmet des données dans son slot, le taux de collision est diminué.

- Lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il devient en état sommeil pour conserver son énergie.

- Rotation des rôles de chefs de groupes permet la longévité du réseau.

- Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CH afin d'optimiser l'utilisation du média de communication en la faisant gérer localement par un CH pour minimiser les interférences et les collisions.

- L'agrégation de données permet de réduire la quantité d'informations transmises. Cela permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, de simplifier la gestion du réseau, d'optimiser les dépenses d'énergie.

- **Inconvénients :**

- Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.

- L'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-sauts diminue.

- Le protocole LEACH ne peut pas être appliqué à des applications temps-réel du fait qu'il résulte en une longue latence.

- La rotation des CH permet de ne pas épuiser les batteries. Cependant, cette méthode n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CH, et qui réduit le gain d'énergie initial.

La section ci-dessous présente les différentes variantes de protocole leach que les auteurs en proposent pour répondre aux problèmes de protocole LEACH.

### **3.5.2 Les variantes de LEACH**

LEACH est un protocole hiérarchique de routage de base qui a donné naissance aux variantes suivantes :

#### **3.5.2.1 Centralized Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(LEACH-C )**

Ce protocole [29] est une version améliorée du protocole LEACH, qui adopte presque les mêmes étapes que lui, mais avec une méthodologie de structuration totalement différente. Cependant, sa phase d'état stable est la même que celle de LEACH. Par contre, lors de la phase d'initialisation, ce protocole agit différemment et

essaye d'assurer une distribution uniforme de CHs. Tout nœud du réseau transmet à la station de base des informations sur sa localisation(en utilisant GPS) ainsi que sur son niveau d'énergie. Dès lors, la station de base va utiliser ces informations globales sur le réseau pour produire une meilleure structuration en clusters, en calculant le nombre optimal de ces clusters par un protocole d'optimisation, tout en se basant sur la moyenne des niveaux d'énergie. Et donc, elle va affecter pendant chaque itération, des rôles pour les différents nœuds; CH ou capteur simple. Les nœuds ayant un niveau d'énergie supérieur à la moyenne sont élus comme CHs. Dès que le nombre optimal de clusters est déterminé, la station de base annonce les identités de CHs par une diffusion de messages dans le réseau. Pour continuer le fonctionnement de ce protocole de la même façon que LEACH.

- **Avantages :**

- LEACH-C permet une diminution remarquable de la consommation énergétique

- **Inconvénients :**

- la version centralisé n'est pas adaptée aux réseaux de grande dimension,due à l'overhead engendrée dans le réseau suite au grand nombre de messages échangés.

### 3.5.2.2 Fixed number of cluster Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-F)

Le protocole LEACH-F a été proposé pour minimiser le coût de l'overhead lors de la formation des clusters. Ainsi, dans LEACH-F, les clusters sont formés une seule fois et le rôle de clusterhead tourne parmi les noeuds membres du même cluster [30].

- **Avantages :**

- Elimination des frais généraux de la re-clustering dans LEACH de base.
- Une fois que le nombre fixe de cluster est formé; ils sont maintenus tout au long du réseau.

- **Inconvénients :**

- Ce protocole ne fournit aucune possibilité d'ajouter ou de retirer les nœuds une fois les clusters sont formés et les nœuds ne peuvent pas ajuster leur comportement sur le nœud mort.

### 3.5.2.3 Balanced Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-B)

LEACH-B utilise l'approche décentralisée de la formation de cluster dans laquelle chaque nœud de capteur connaît sa propre position et la position de destination finale, indépendamment de la position du reste des nœuds du réseau. LEACH-B fonctionne en trois étapes : sélection du CH, formation des Clusters et transmission de données avec accès multiples. Selon l'énergie dissipée dans le chemin entre un nœud et un récepteur final, chaque nœud choisit son CH [31].

- **Avantages :**

- Meilleure efficacité énergétique que le protocole LEACH de base.

- **Inconvénients :**

- La distance doit être considérée encore pour le meilleur choix de CH et ce protocole dépend d'une distance limitée.

### 3.5.2.4 Two level Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(TL-LEACH)

Contrairement au protocole LEACH où les CH envoient des données à la station de base directement en un seul saut, le protocole TL-LEACH fonctionne dans la hiérarchie à deux niveaux. Les données agrégées de chaque CH sont recueillies par un CH qui se trouve entre les CHs et la station de base, au lieu d'envoyer directement à la station de base [32].

- **Avantages :**

- Ce protocole réduit l'énergie de transmission de données.
- Les CHs meurent tôt par rapport à d'autres nœuds, loin de la station de base et TL-LEACH améliore l'efficacité énergétique en utilisant un CH comme nœud de relais entre les CHs de cluster.

- **Inconvénients :**

- Frais généraux supplémentaires pour l'élection des CHs secondaires et la formation des clusters .

### 3.5.2.5 Energy Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(LEACH-E)

Dans le protocole LEACH-E, d'abord tous les nœuds ont la même énergie et même probabilité de devenir CH. Après le premier tour, le niveau de chaque nœud change. Ensuite, la quantité d'énergie résiduelle de chaque nœud est utilisée pour sélectionner des CHs. Les nœuds avec la plus haute énergie résiduelle sont préférés sur le reste des nœuds [31].

- **Avantages :**

- LEACH-E améliore la durée de vie du réseau en équilibrant la charge de l'énergie entre tous les nœuds du réseau.

- **Inconvénients :**

- Le réseau doit être équipé de GPS pour déterminer la position des nœuds et de CH.

### 3.5.2.6 Multi-Hop Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (MH-LEACH)

Dans le protocole LEACH, les CHs envoient des données à la station de base directement quel que soit la distance entre eux. Cela entraînera la dissipation d'énergie élevée du nœud principal du cluster si la station de base est située loin de là. Comme le diamètre de réseau augmente, la distance entre la station de base et CHs augmente. Pour accroître l'efficacité énergétique du protocole, la communication multichemin est introduite. Tout d'abord les noeuds membres du cluster envoient des données à leurs CH respectifs qui transfèrent les données vers un autre CH plutôt puis au station de base directement [33].

- **Avantages :**

- Ce protocole adpte un chemin optimal entre les CHs et la station de base.

- **Inconvénients :**

- Ce protocole n'est pas adapté pour que le CH utilise d'autres itinéraires possibles de sa table dans un rond tenant compte de la batterie restante dans les CHs voisins.

### **3.5.2.7 Mobile Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy(LEACH-M)**

Le protocole LEACH-M a été proposé pour la délivrance de la mobilité dans le protocole LEACH. Ce protocole assure la mobilité des CHs non-cluster et CHs par rapport à la mise en place et à l'état d'équilibre. Les nœuds sont homogènes et l'emplacement de chaque nœud est calculé par GPS [34].

- **Avantages :**

- Les nœuds à mobilité minimale et la plus faible atténuation sont sélectionnés en tant que CHs et le rôle des CHs est diffusé à tous les nœuds dans sa plage de transmission.

- **Inconvénients :**

- Le seuil de vitesse et les modèles de temps ronds devraient être développés pour l'utilisation de ce protocole.
- La surveillance d'endroit et des frais généraux sont coûteux .

### **3.5.2.8 Improved Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (I-LEACH)**

La détection de nœuds jumeaux et l'affectation des Sous-Clusters Head (SCH) nœuds sont les deux fonctions desservies par le protocole amélioré-LEACH. Aléatoirement, le déploiement de nœuds entraîne une forte probabilité d'avoir deux nœuds situés très près l'un de l'autre, appelés jumeaux. Il est nécessaire de garder un sommeil de nœud jusqu'à ce que l'énergie d'un autre nœud épuise. Par conséquent, I-LEACH a une distribution uniforme de CH qu'il ne manque pas d'énergie lorsque la transmission est plus à distance à lieu [31].

- **Avantages :**

- Ce protocole utilise l'approche de seuil pour la gestion de nombre de membres du cluster pour chaque CH dans le réseau à un moment.

### **3.5.2.9 Advanced Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH-A)**

Parmi les inconvénients du protocole LEACH, on peut citer la consommation d'énergie du CH par rapport aux nœuds normaux. Le protocole A-LEACH est



considère comme un protocole hétérogène utilisé dans le but de diminuer les probabilités des nœuds défaillants ainsi que le prolongement de l'intervalle de temps avant la mort du premier nœud (appelée période de stalabilité). Dans A-LEACH, chaque capteur connaît le départ de chaque tour et cela en utilisant l'horloge synchronisée [31].

- **Avantages :**

- Un algorithme distribue où la configuration des clusters est indépendante de la station de base.

- Les techniques TDMA/ CDMA permettant l'hiérarchie des groupes à différents niveaux;économise un maximum d'énergie.

- **Inconvénients :**

- Ce protocole consomme plus d'énergie lors de la transmission de l'information à station de base.

### 3.5.2.10 Cell Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (Cell-LEACH)

Dans Cell-LEACH, RCSF est divisé en plusieurs groupes où chaque groupe est divisé à son tour en 7 sections appelées cellules. Plusieurs capteurs sont inclus dans chaque cellule à partir de laquelle un nœud de capteur est sélectionné comme Cell Head. une fois formés, les groupes et les cellules ne peuvent plus être modifiés. Chaque nœud de la cellule envoie des données à Cell Head à l'heure désignée donnée par TDM. La fonction d'agrégation des données est effectuée par les Cell Head et les données traitées sont envoyées aux station de base [35] .

- **Avantages :**

- Cell Head supprime les informations redondantes.
- Une agrégation de données est effectuée aux informations reçus de différentes sources.

- **Inconvénients :**

- CH et Cell HEAD sont déterminés d'une manière au hasard.

### 3.5.2.11 Multi Group based(MG LEACH)

C'est un protocole de rendement optimum de cheminement basé sur LEACH, ce dernier consiste une approche de trois étapes : Les deux premières correspondante à

celles de LEACH, qui sont la phase de l'installation et la phase de régulation d'état, pour la troisième étape qui est la phase de construction où les nœuds sont distribués en sous-groupes selon leur positions. Chaque nœud qui est équipé de GPS fait suivre à l'information de localisation directement vers la station de base. La station de base utilise cette information pour chaque phase de construction d'ensemble [36].

- **Avantages :**

- La durée de vie du réseau est augmentée cela est dû à la redondance de ces composants (nœuds).

### 3.5.3 Comparaison entre les différentes variantes de LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

La table (Tab. 3.2) montre la comparaison entre les protocoles étudiés précédemment suivant les points cités ci-dessous :

- **Année :** Cette colonne nous montre l'année à laquelle remonte la définition de chaque protocole.

- **La mobilité :**

Un autre paramètre qui semble intéressant à prendre en considération, lors de la comparaison entre ces protocoles de routage, est la mobilité des nœuds. La plupart des protocoles courants supposent que les nœuds capteurs sont stationnaires. Cependant, il existe des situations ou des environnements où les nœuds capteurs doivent être mobiles. Dans ces cas, la mise à jour fréquente de la position du nœud et la propagation de cette information dans le réseau peuvent considérablement diminuer l'énergie des nœuds.

- **La scalabilité :** Ce point a été abordé dans le paragraphe (1.3.8.B chapitre 1).

- **Organisation automatique :** Les protocoles dont la colonne " organisation auto " correspond à " oui " sont ceux dont l'organisation des nœuds est faite de façon automatique. Tandis que dans le cas où la valeur est égale à " non " les nœuds doivent être organisés manuellement.

- **Nombre de sauts :** Le nombre de pas que fait un paquet pour passer d'un nœud à un autre. Dans le cas où le protocole à itinéraire unique un paquet est

transmis par un et un seul chemin, par contre, dans le multi chemin un nœud dispose de plusieurs chemins pour transmettre un message a sa destination.

- **Les informations de localisation "Position awareness" :**

Quelques approches de routage se fondent sur la localisation des emplacements des nœuds capteurs où ils sont déployés afin de router les données d'une manière efficace, ce que nous appelons position aware.

	Année	Mobilité	Scalabilité	Organisation auto	Nombre de sauts	Informations de localisation
LEACH	2002	puits fixe	Limitée	Oui	Unique itinéraire	Non
LEACH-C	2002	puits fixe	Bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
LEACH-F	2002	puits fixe	Limitée	Non	Unique itinéraire	Oui
LEACH-B	2003	puits fixe	Bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
TL-LEACH	2005	puits fixe	Très bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
LEACH-E	2007	puits fixe	Très bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
MH- LEACH	2007	puits fixe	Bonne	Oui	Multi chemins	Oui
LEACH-M	2008	puits mobile	Très bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
I- LEACH	2009	puits fixe	Très bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
LEACH-A	2010	puits fixe	Bonne	Oui	Unique itinéraire	Oui
Cell-LEACH	2012	puits fixe	Très bonne	Oui	Multi chemins	Oui
MG-LEACH	2012	puits fixe	Très bonne	Oui	Multi chemins	Oui

TAB. 3.2 – Comparaison entre les differentes variantes de LEACH [31].

D'après la table ci-dessus (Tab. 3.2) établie depuis l'étude des protocoles discutés dans la section (3.5), nous avons remarqué que chaque protocole est bon par rapport à des critères de comparaison. Cependant, il est mauvais par rapport à d'autres. Ce qui nous permet de dire qu'il est difficile de concevoir un protocole qui supporte tous ces critères.

## 3.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous nous sommes rapprochés de la culstérisassion pour les RCSFs , Puis nous avons décrit le protocole LEACH à savoir ses variantes .

Le protocole LEACH est considéré une base pour tous les protocoles hiérarchiques proposés dans la littérature. Il a beaucoup de mérites comme l'équilibrage de la charge, énergie efficacité et auto-organisation. Mais, il a certains démérites comme l'évolutivité pauvre pour des secteurs de réseau très grand et il ne considère pas l'énergie résiduelle de différents nœuds de capteurs. Par conséquent, pour surmonter les démérites, beaucoup de chercheurs proposent toujours les versions modifiées du protocole LEACH.

Dans le prochain chapitre nous allons comparer le protocole LEACH avec ses deux variantes TL-LEACH et MG-LEACH.

# Evaluation de performances de LEACH et ses variantes

## 4.1 Introduction

D'après l'étude effectuée dans le chapitre précédent concernant l'un des premiers protocoles de routage hiérarchique qu'est LEACH ainsi que ses quelques variantes.

Nous choisissons dans ce qui suit de comparer ce protocole LEACH à TL-LEACH et MG-LEACH et cela en utilisant une simulation. Pour se faire, le chapitre est découpé en trois parties :

La première étant réservée à la présentation des différents simulateurs existants mais aussi à notre choix qui est le simulateur MATLAB pour les plusieurs avantages qu'il l'offre.

Concernant la seconde partie, nous définissons les paramètres de simulation que nous jugeons nécessaires pour notre comparaison ainsi que les métriques d'évaluation de performance choisie.

Enfin dans la dernière partie, nous illustrons et discutons les différents résultats obtenus.

## 4.2 Simulateurs de réseau de capteurs

Plusieurs simulateurs ont été conçus pour les réseaux sans fil :

- **NS2 (Network Simulator)** : C'est un simulateur à événements discrets développé à Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Il s'agit d'une extension de NS conçue pour les réseaux sans fil. Son langage de base est le C++. L'outil Network Animator (NAM) associé au simulateur NS permet de visualiser des animations de la simulation (transfert de paquets d'un nœud à un autre, taille des paquets, remplissage des files d'attente,...etc) [37].

- **Optimum NETWORK Performance (OPNET)** : comme NS, OPNET est un simulateur à événements discrets. C'est un outil très puissant pour la simulation et l'évaluation de performance d'un réseau. Il permet aussi à l'utilisateur de construire ses propres modèles, des plus simples aux plus complexes [37].

- **TOSSIM** : C'est le simulateur de TinyOs créé par l'université de Berkeley. Le principal but de TOSSIM est de créer une simulation très proche de ce qui se passe dans les RSCF dans le monde réel. Une économie d'effort et une préservation du matériel sont possibles grâce à cet outil . Pour une compréhension moins complexe de l'activité d'un réseau, TOSSIM peut être utilisé avec une interface graphique TinyViz. Elle permet de donner un aperçu des capteurs à tout instant ainsi que les divers messages qu'ils émettent [37].

## 4.3 Choix de l'environnement de simulation

Matrix laboratory (MATLAB) est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques. C'est un langage de programmation basé essentiellement sur le calcul matriciel, avec des fonctionnalités mathématiques et graphiques étendues. Il a été développé par la société MathWorks reconnu par sa simplicité, son efficacité et sa grande puissance de calcul, Matlab est classé parmi les langages complet et de haut niveau [37].

Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, etc...

Nous avons opté pour Matlab, puisqu'il s'agit d'une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et

portable et que dans notre simulation nous utilisons beaucoup les matrices.

## 4.4 Paramètres de simulation

Pour que l'évaluation des performances du protocole LEACH et ses variantes 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 ci-dessous résume quelques paramètres utilisés :

Paramètre	Valeur
localisation de SB	(x=50, y=175)
Le nombre du noeuds	100
Energie initial de réseaux	1Joul
taille de paquet	128 bytes
la valeur d'énergie électronique	$5 \cdot 10^{-7}$ Joul
la valeur d'énergie d'amplication	$13 \cdot 10^{-15}$ Joul
la valeur de Rayon couverture	183
la valeur de Rayon de communication	100

TAB. 4.1 – Paramètres de simulation.

## 4.5 Métriques d'évaluation de performance

### 4.5.1 Energie consommée

L'un des principaux critères de performances pour un capteur est la durée d'utilisation efficace de son énergie embarquée avant de l'épuiser, car dernier elle n'est ni rechargeable ni remplaçable

Ainsi, l'Énergie Consommée (EC) mesure la quantité d'énergie consommée par un capteur. Elle est obtenue par la somme de joules de tous les noeuds au nombre de noeuds du réseau. Mathématiquement, on peut l'exprimer ainsi :

$$EC = \sum_{i=1}^n E_i$$

Où :

$E_i$  : l'énergie consommée pour un capteur  $i$ . Elle présente la différence entre l'énergie initiale et son énergie résiduelle. Et  $n$  : est le nombre de capteurs dans le réseau [11].

#### 4.5.2 Durée de vie du réseau

Pour mesurer la durée de vie du réseau, nous avons choisi de suivre l'évolution du nombre de noeuds en vie au cours du temps. En effet, cette métrique nous donne un aperçu sur la façon et la fréquence de la mort des noeuds. Elle peut être utilisée pour déterminer la durée de vie du réseau selon le temps qui s'écoule avant que le dernier noeud en vie dans le réseau épuise son niveau d'énergie.

#### 4.5.3 Scalabilité

Les noeuds capteurs sont déployés en grande quantité car ces derniers sont à faible coût mais aussi ils ont une capacité limitée que ce soit dans l'énergie ou bien dans le traitement de données, cela nous a mené à choisir le critère de la scalabilité dans la comparaison de nos protocoles.

#### 4.5.4 Nombre de paquet par rapport aux nœuds capteurs dans le reseau

Au moment que le paquet est la donnée manipulée par les nœuds dans un RSCF donc on voulut varier le nombre de nœuds du réseau pour contacté la variation de nombre de paquets.

#### 4.5.5 Nombre de paquet par rapport au temps

Les capteurs sont déployés dans un environnement à la fin de collectés des informations et de les transmettre sous forme de paquets a une station à distance qui pourra les traités, c'est pour cela que nous sommes dans l'obligation de surveiller ce critère par rapport au rond, car il peut influencer considérablement sur la durée de vie du réseau.



## 4.6 Discussions des résultat de simulation

### 4.6.1 Energie consommée

Nous avons comparé l'énergie résiduelle des trois protocoles LEACH ,TL-LEACH et MG-LEACH en fonction du temps comme illustre la figure suivante :

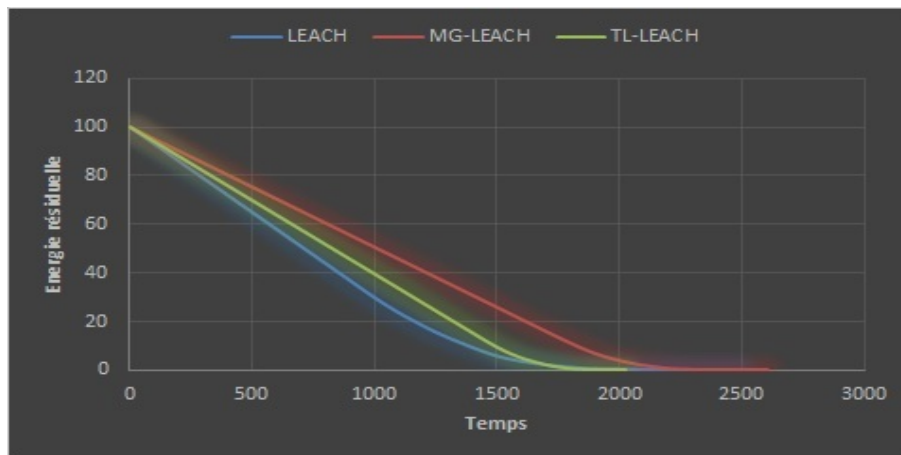


FIG. 4.1 – Energie résiduelle part rapport au temps des trois protocoles.

De la Figure 4.1 nous remarquons que l'énergie résiduelle du réseau utilisant MG-LEACH est supérieur à l'énergie résiduelle du réseau utilisant LEACH ou TL-LEACH et cela est dû au nombre de paquets échangés qui est moins important dans le protocole MG-LEACH en comparant aux deux autres protocoles.

### 4.6.2 Durée de vie du réseau

De la figure suivante, on constate que le protocole MG-LEACH est plus intéressant car la mort des noeuds ne commencent pas jusqu'à  $T=2000$  alors que pour LEACH et TL-LEACH elle comence à  $T=1000$  et  $T=1500$  respectivement et si on regarde la mort de la totalité des neouds pour MG-LEACH elle est 4000 alors que pour LEACH 2040 et 2500 pour TL-LEACH.

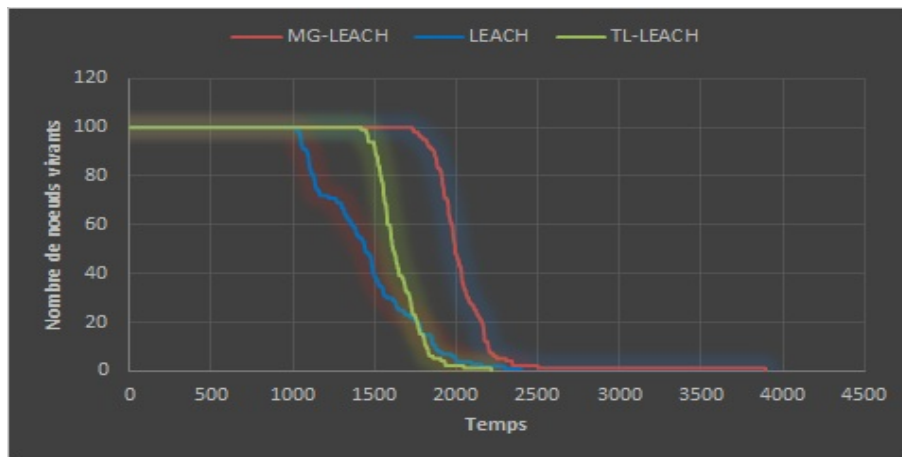


FIG. 4.2 – Nombre des noeuds vivantes.

### 4.6.3 Scalabilité

D'après le graphe suivant qui spécifie le passage à l'échelle en fonction du temps d'un RCSF, en augmentant le nombre de noeuds on observe que dans chaque ajout de noeuds la durée de vie du réseau diminue systématiquement, cela est causé par le nombre croissant de paquets échangés entre les capteurs. Cependant le protocole MG-LEACH reste au dessus du protocole LEACH ainsi que le protocole TL-LEACH ceci montre que ce dernier peut être utilisé même si le nombre de noeuds dépassent 2000.

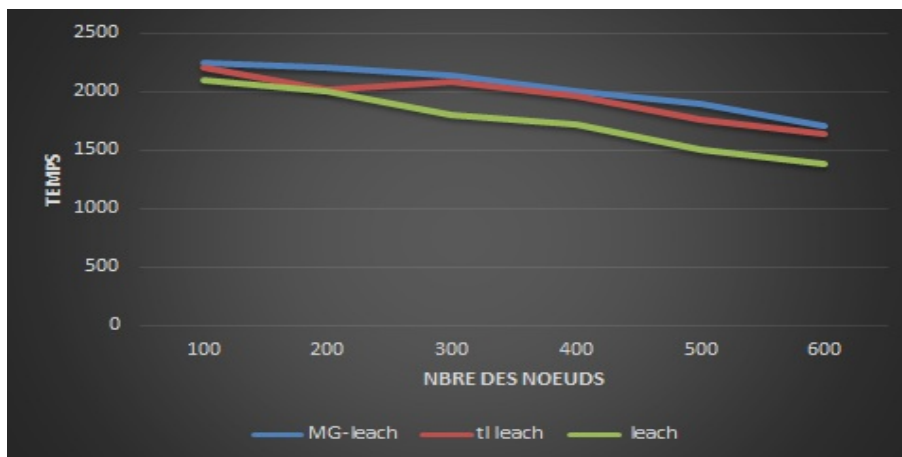


FIG. 4.3 – Scalabilité.

#### 4.6.4 Nombre de paquet par rapport aux nœuds capteurs dans le réseau

Nous avons calculé le nombre de paquets émis/reçus des trois protocoles. L'histogramme ci-dessous illustre le nombres de paquet émis/reçus par rapport aux nombres de noeuds du réseau .De la simulation du protocole MG-LEACH comparé avec LEACH de base et TL-LEACH nous remarquons,que le nombre de paquets échangés dans le réseau en utilisant le premier protocole est beaucoup moins important que celui en utilisant les deux autres protocoles

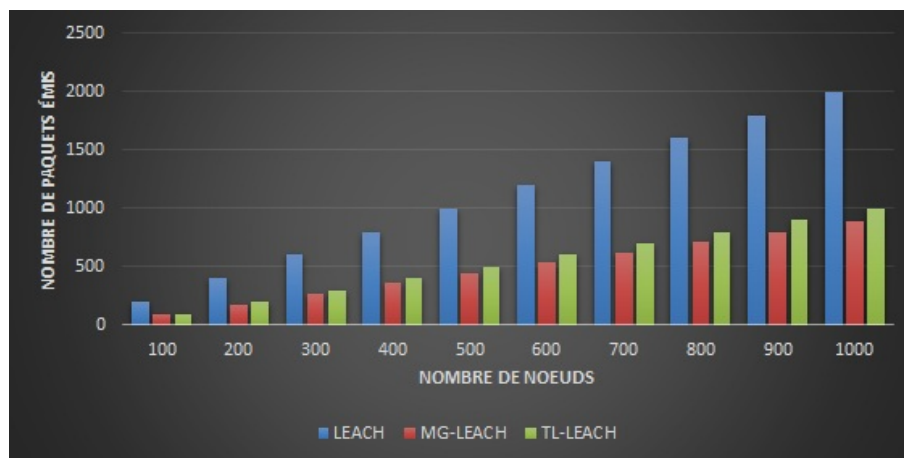


FIG. 4.4 – Nombre de paquets émis par les nœuds .

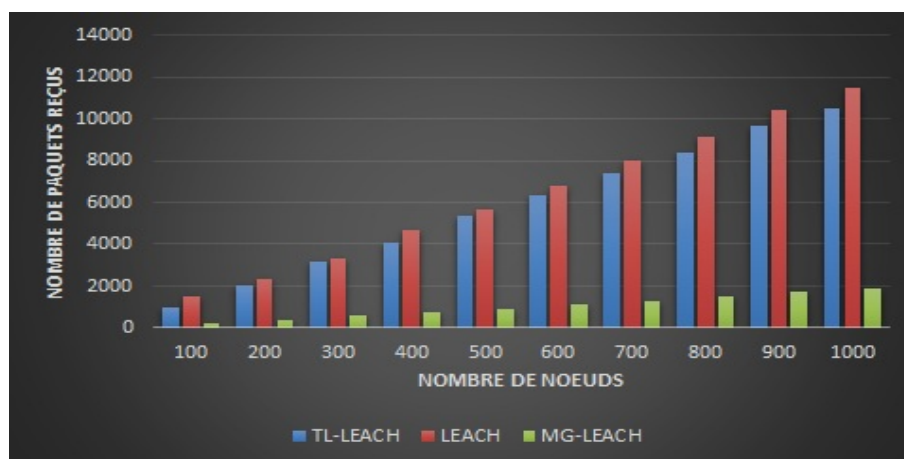


FIG. 4.5 – Nombre de paquets recus par les nœuds .

#### 4.6.5 Nombre de paquet par rapport au temps

Nous avons calculé le nombre de paquets émis et reçus des trois protocoles. La figure ci-dessous illustre le nombre de paquets émis/recus par les noeuds pour chaque instant de simulation du protocole MG-LEACH comparé avec LEACH et TL LEACH . Comme nous observons, que le premier protocole est meilleur que les deux autres

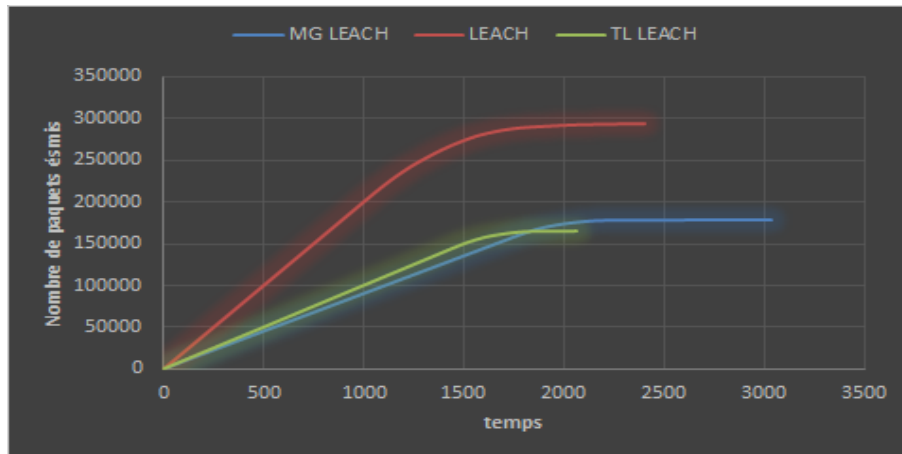


FIG. 4.6 – Nombre paquet émis par rapport au temps.

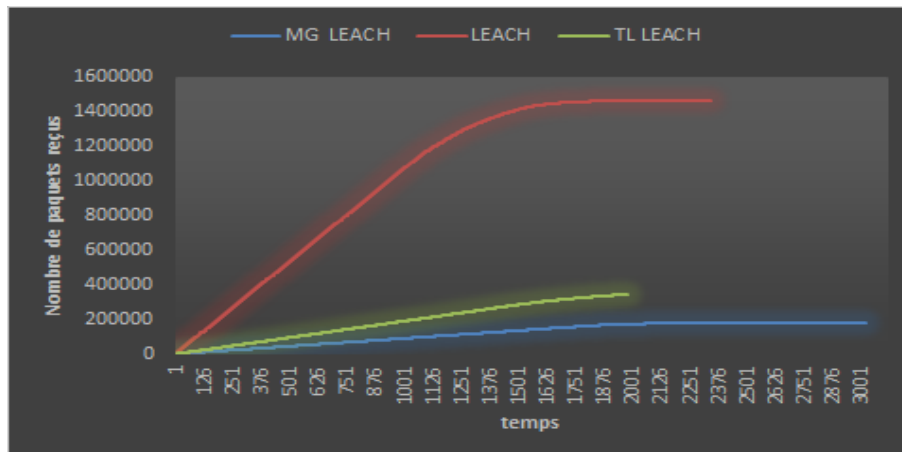


FIG. 4.7 – Nombre paquet recus par rapport au temps.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation qui ont montré que le protocole MGLEACH est meilleur que les protocoles LEACH et TL-LEACH et ceux en terme d'énergie ,de passage à l'échelle ainsi que la communication.

# Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont, souvent, qualifiés de technologie émergente qui va bouleverser notre quotidien. Ces composants électroniques d'une taille très réduite et qui communiquent via un réseau sans fil omniprésent, ouvrent largement les horizons des applications construites jusqu'à maintenant.

Caractérisés par une souplesse sans équivoque, les RCSFs permettent une panoplie d'application qui touchent et continuent à toucher tous les domaines de notre vie ; commençant par les applications militaires, qui ont conçu le berceau dans lequel ils se sont développés ; puis les applications civiles à savoir celles de la surveillance de l'environnement, des structures et du trafic de tout type ; et en arrivant aux applications médicales qui incluent la surveillance des patients à domicile ou à l'hôpital. Cette liste non exhaustive plaide le succès de cette technologie.

Dans ce mémoire nous avons commencé par présenter les généralités qui entourent le domaine de RCSFs, puis nous avons focalisé notre étude sur la fonctionnalité clé de ces derniers qui est le routage de données à partir des nœuds sources vers une station de base. Cette dernière s'occupe des traitements spécifiques aux applications supportées. Nous avons montré les différentes classes de routage existant dans la Littérature qui sont imposées par les caractéristiques physiques des réseaux capteurs sans fil.

La première classe étant ,le routage à consommation d'énergie minimale cette optimisation se fait par le choix de la route à consommation d'énergie minimale tandis que la seconde classe s'est nommée topologie de routage qu'est basée sur l'architecture des RCSFs puis vient la troisième catégorie appelé protocole basé sur

l'initiateur de consommation, celle-ci, peut-être déclencher par un noeud source, soit par un noeud destinataire.

Dans la dernière classe, on trouve les protocoles classifiés selon leur fonctionnalité.

Nous nous sommes intéressés à la solution de routage classifié par rapport à la topologie du réseau utilisé. Nous avons focalisé, par la suite, notre étude sur la classe des protocoles de routage hiérarchique qui garantissent une optimisation de la consommation en énergie. L'optimisation du réseau de capteurs en groupes, dit clusters, permet une distribution de la consommation d'énergie sur le réseau et une spécification des tâches selon le type de nœuds (les ClusterHeads(CHs) se chargent de la dissémination et l'agrégation des données vers la station de base, alors que les autres nœuds se chargent de la collection de données et la dissémination locale vers les CHs).

Après l'étude détaillée du Protocole LEACH, les chercheurs ont décelé et corrigé les défauts de ce protocole et ceux en émergeant de nouveaux protocoles qui sont considérés comme des variantes de LEACH.

Dans notre travail nous voulons voulu comparer LEACH avec TL-LEACH et MG-LEACH qui sont des variantes du protocole LEACH, le premier a été choisi car il utilise la localisation ainsi que son avantage de forte scalabilité pour le seconde choix a été fait car MG-LEACH utilise un multi-saut dans sa communication.

Cependant notre comparaison a démontré que MG-LEACH dépasse les deux autres protocoles choisis puisqu'il consomme moins d'énergie dans la construction de groupe de fait que cette phase a été exécutée qu'une seule fois donc elle permet l'augmentation de la durée de vie du réseau.

# Bibliographie

- [1] A. Berrachedi, "Sécurisation du protocole de routage hiérarchique LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil", mémoire d'ingénieur en informatique, école nationale supérieure d'informatique Alger, 2009.
- [2] B. Djawhara, "sécurité de la dissémination de données dans un réseau de capteurs sans fil", mémoire d'ingénieur en informatique, école nationale supérieure d'informatique Alger, 2009.
- [3] T. Lemlouma, " Le routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc ", Mini projet, Institut National de Recherche en Informatique et Automatique INRIA, 2000.
- [4] M.Frodigh, P.Johansson, P. Larsson, " Wireless ad hoc networking - The art of networking without a network ", journal on wireless communications and networkings ,PP : 248-263, 2000.
- [5] B. Tharon, F.Dupont, L.Nuaymi, S.Gombault, V.Gayraud, "La Sécurité dans les Réseaux Sans Fil Ad Hoc", Conférence SSTIC03 ,2003.
- [6] D. Dessales, "Conception d'un réseau de capteurs sans fil faible consommation dédié au diagnostic in-situ des performances",thèse de doctorat en Sciences et Ingénierie pour l'Information de l'université de poitiers france,2006.
- [7] S. Kaplantzis, " Security models for wirless sensor networks ", rapport de recherche,université de melbourne Australia ,2006.



- [8] Y. Romdhane, " Evaluation des performances des protocoles S-MAC et directed diffusion dans les réseaux de capteurs ", mémoire d'ingénieur en Télécommunications, école supérieure des communications de Tunis, 2007.
- [9] B. Kechar, " problématique de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ", thèse de doctorat en informatique , université d'Oran,2010.
- [10] J. Al-Karaki, A. Kamal, " Routing technique in wireless sensor networks : a survey ", dept. of electrical and computer engineering, Iowa state University,2008
- [11] M. khelifi, " optimisation de la consommation d'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil ", mémoire de magistère en informatique, université de Bejaïa,2008.
- [12] L. Khelladi, N. Badache," les reseaux capteurs sans fil :Etat de l'art", rapport de recherche,faculté électronique et infotmatique ,université houari boumedien Alger , 2004.
- [13] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. l. Cayirci. "Wireless sensor networks : A survey". IEEE Computer Networks, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422,2002.
- [14] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci "A survey on sensor networks :", IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116,2002.
- [15] N. Mitton. "Auto-organisation dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle". Thèse de doctorat en informatique et réseaux, INRIA Rhone Alpes, Lyon, France,2006.
- [16] T. Nieberg, S. Dulman, P. Havinga, L-V. Hoesel, and J. Wu, "Collaborative algorithms for communication in wireless sensor networks. Ambient.intelligence : Impact on Embedded Systems", Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [17] S. Maya, " Energy efficient protocol(eep) : un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil ", mémoire d'ingénieur en informatique

- , école nationale supérieur d'informatique (ESI),2009.
- [18] B. krishnamachari, D. Estrin , and S.Wicker .” Modelling data-centric routing in wireless sensor networks”, Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2002.
- [19] R. Zitouni, ”Routage à base consommation d'énergie dans les réseaux capteurs sans fil ” , mémoire de magistère en informatique, université de Bejaïa ,2006.
- [20] S.ouyahia yessad , ” Optimisation de la consommation de l'énergie dans les réseaux capteurs sans fil ” , thèse de doctorat en informatique, université de Bejaïa,2015.
- [21] H. Callaway, ”Wireless Sensor Networks : Architectures and Protocols”, CRC Press ,2004.
- [22] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, ”Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks”, Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, 2000.
- [23] K. Xu and M. Gerla, ”A Heterogeneous Routing Protocol Baetsed on a New Stable Clustering Scheme”, in the Proceeding of IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2002).Anaheim, CA, 2002.
- [24] R. Nagpal and D. Coore, ”An algorithm for group formation in an amorphous computer”, Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems (PDCS'98), Las Vegas, NV, 1998.
- [25] A. Abbasi, M. Younis ”A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks”, Computer. Communication Architecture, vol. 30,no. 14-15, pp. 2826-2841, 2007.
- [26] D. J. Dechene, A. El Jardali, M. uccini, A. Sauer,” A Survey of Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks”, Project Report, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Western Ontario, Canada, 2007.

- [27] A. Delye, V. Gauthier, M. Marot, and M. Becker. "Etat de l'art sur les réseaux de capteurs", Rapport de recherche INT N-05001RST GET-INT, UMR5157 SAMOVAR, Institut National des Télécommunications, Evry, France, 2005.
- [28] A.Manjeshwar and D.P.Agarwal,"Teen a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks",conference ,canada,2001.
- [29] F.KRIEF et L.DEHNI, "LAE2C : une nouvelle approche de routage dans les réseaux de capteurs pour l'optimisation de la consommation d'énergie",conference, Villetaneuse,2005.
- [30] F.Remmas, " Evaluation de leanch dans un environnement fortement bruite ", mémoire mastre en informatique, université de béjaia , 2015.
- [31] R.Ralhan, s.Singhcoarich, "Review on various leach variants", journal engineering of sciences, vol. 1,pp. 73-78 ,india ,2016.
- [32] V.loscri, G.morabito, S.Marano, "A Two-Levels Hierarchy for low-Energy Adaptive clustering hierarchy (TL-Leanch)", vehicular technology conference,université de calabria italy ,2005.
- [33] J.Brandao, A.silvarego , " MH-leanch :A Distributed for multi-hop communication in coireless sensor Network" , the thirteenth international conference on Networks, State University of Cearà (UECE) Fortaleza Brazil , 2014.
- [34] A.Ahmed, "Cluster Heard selection Algorithme for Wireless senor Network ", conference , National University of Sciences and Technology (NUST) Karachi Pakistan,2013.
- [35] A.yektaparast , F.nabavi, A.saramast, " An Improvement on leack protocol (cell-leach)",Islamic Azad University, Dezful Branch, Iran, 2012.
- [36] R.Ralhan, S.Singhcoarich, "Review on various leach variants journal", engineering sciences , Deptt. Of CSE GNDU Amritsar India ,2014.

- [37] L.Sabrina, " La diffision dans les réseaux de capteurs sans fil avec économie d'énergie ", mémoire de master en informatique, université de Bejaïa,2013.

## Résumé :

Le routage de données dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) est reconnu comme un domaine de recherche très actif vu les spécificités de ce type de réseau, où la consommation de l'énergie et le passage à l'échelle sont considérés comme les défis majeurs des protocoles de communication proposés. Cependant, le routage hiérarchique des données dans les RCSFs, est une classe spécifique des protocoles de routage, elle englobe les solutions qui adoptent une restructuration du réseau physique en un système de hiérarchie logique, visant l'optimisation de la consommation de l'énergie et le passage à l'échelle.

Plusieurs solutions de routage hiérarchiques utilisent la technique du Clustering pour minimiser la consommation de l'énergie ; à titre d'exemples : LEACH qui utilise la rotation aléatoire de la position du cluster-head et l'ensemble des capteurs du cluster, pour mieux répartir la consommation d'énergie entre tous les nœuds du cluster, mais à partir des simulations que nous avons réalisé sous Matlab on a remarqué que ce dernier a connu plusieurs anomalies et pour cela les auteurs ont proposé des améliorations pour ce protocole qu'on appelle des variantes. Et pour cela dans notre travail on fait appel à une comparaison entre LEACH et quelques variantes.

Mot clé : RCSFs, LEACH, protocole de routage, Cluster, consommation d'énergie, Matlab, Routage hiérarchique.

## Abstract:

Data routing in wireless sensor networks (WSNs) is a very active area of research given the specificities of this type of networks, where the consumption of energy and scalability are considered as the major challenges for the available communication protocols. However, the hierarchical data routing I WSNs is a specific class of routing protocols; it includes solutions that restructure the physical network in a logical hierarchy system, aiming at the optimization of the consumption of energy and scalability.

Several hierarchical routing solutions use clustering techniques, to minimize energy consumption; as examples: LEACH that uses the random rotation of the position of the cluster-head and all cluster sensors to better distribute energy consumption among all nodes in the cluster, but from simulations we have achieved in Matlab it was noted that it experienced several anomalies and for this the authors have proposed improvements to the protocol when called variants. And why in our work Apelles made a comparison between LEACH and some variations.

Keywords: WSNs, LEACH, routing protocol, cluster, energy consumption, Matlab, hierarchical routing.