

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique  
Université de JIJEL  
Faculté des Sciences Exactes



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master  
Académique

En : *Informatique*

Option : *Réseaux et sécurité*

Sujet

---

**Les protocoles de routage hiérarchiques  
Dans les réseaux de capteurs sans fil  
Étude de cas : LEACH et ses variants**

---

*Encadrant :*  
Mr. Rouibah SAID

*Réalisé par :*  
Bourebria NOUR EL HOUDA  
Bousnindja HESNA

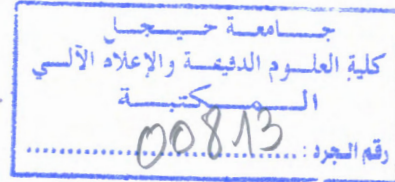
*Année universitaire*  
2018-2019

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique

Université de JIJEL  
Faculté des Sciences Exactes

ع  
ع

inf. R.S. 04/19



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master  
Académique

En : *Informatique*

Option : *Réseaux et sécurité*

Sujet

---

**Les protocoles de routage hiérarchiques  
Dans les réseaux de capteurs sans fil  
Étude de cas : LEACH et ses variants**

---

*Encadrant :*  
Mr. Rouibah SAID

*Réalisé par :*  
Bourebria NOUR EL HOUDA  
Bousnindja HESNA

*Année universitaire*  
2018-2019



## **Remerciement**

***Louange À Dieu, le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être.***

*Nous tenons à remercier vivement Mr. Rouibah Said, pour nous avoir honoré par son encadrement, pour sa disponibilité, ses orientations, ses précieux conseils et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.*

*Nous remercions chaleureusement tous nos enseignants et enseignantes pour leurs conseils, leurs gentillesse, leurs générosité et leurs contribution à notre formation.*

*Un énorme merci à nos familles et amis pour leurs éternel soutien et la confiance qu'ils ont en nos capacité.*

*À tous ceux que nous aimons, et à tous ceux qui nous aiment.*

*Merci infiniment.*

***Je dédie ce modeste travail à :***

***A mes chers parents,***

***A mes frères et ma chers sœur Soumia,***

***A toute la famille,***

***A ma binôme Hesna et sa famille,***

***A mes amies surtout Rofaida et Sarra,***

***A mon promoteur Mr.Rouibah Said,***

***A mes collègues et à toutes les personnes que j'ai connues, un***

***grand MERCI à tous.***

***Bourebia Nour El Houda.***



***Je dédie ce modeste travail à :***

***A mes chers parents,***

***A mes frères et mes chers sœurs,***

***A toute la famille,***

***A ma binôme Nour El Houda et sa famille,***

***A mes amies surtout Soumia, Karima, Rofaida et Sarra,***

***A mon promoteur Mr.Rouibah Said,***

***A mes collègues et à toutes les personnes que j'ai connues, un  
grand MERCI à tous.***

***Bousnindja Hesna.***

# Table des matières

Table des matières	iv
Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Abréviations	ix
Résumé	1
Abstract	2
Introduction générale	3
<b>1 Description des réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction	5
1.2 Définition des RCSFs	6
1.3 Architecture de communication d'un RCSF	6
1.4 Description d'un nœud capteur	7
1.4.1 Définition d'un nœud capteur	7
1.4.2 Architecture de base d'un nœud capteur	7
1.5 Caractéristiques des nœuds capteurs	8
1.6 Fonctionnement d'un capteur	9
1.7 Caractéristique d'un capteur	9
1.8 Communications dans les RCSFs	10
1.8.1 Caractéristiques de la radio	10
1.8.2 Propagation de signal Radio	11
1.9 Difficultés et contraintes	12
1.9.1 Consommation d'énergie	12
1.9.2 La durée de vie	12
1.9.3 La connectivité	13
1.9.4 La sécurité	13
1.9.5 Environnement	13
1.9.6 Agrégation de données	13
1.9.7 Bande passante limitée	14
1.10 Les applications des réseaux de capteurs sans fil	14
1.10.1 applications militaires	14
1.10.2 Applications environnementales	14

1.10.3	Applications médicales . . . . .	15
1.10.4	Applications industrielles . . . . .	15
1.10.5	Applications domotique . . . . .	16
1.11	La pile protocolaire dans les RCSFs . . . . .	16
1.11.1	Plan de gestion d'énergie . . . . .	16
1.11.2	plan de gestion de mobilité . . . . .	17
1.11.3	Plan de gestion de tâche . . . . .	17
1.11.4	Couche application . . . . .	17
1.11.5	Couche de transport . . . . .	17
1.11.6	Couche réseau . . . . .	18
1.11.7	Couche liaison des données . . . . .	18
1.11.8	Couche physique . . . . .	18
1.12	Les états possible d'un capteur . . . . .	18
1.13	Consommation d'énergie . . . . .	18
1.13.1	Énergie de capture . . . . .	19
1.13.2	Énergie de traitement . . . . .	19
1.13.3	Énergie de communication . . . . .	19
1.13.4	Énergie de transition . . . . .	20
1.14	Modèle de consommation d'énergie . . . . .	20
1.15	Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	21
1.15.1	Les protocoles de routage hiérarchique . . . . .	23
1.15.1.1	Les éléments d'un cluster . . . . .	23
1.15.1.2	La classification des clusters . . . . .	24
1.15.1.3	processus d'établissement des clusters . . . . .	25
1.15.1.4	Méthodes de formation des clusters . . . . .	25
1.16	Conclusion . . . . .	26
<b>2</b>	<b>LEACH et ses variants</b> . . . . .	<b>27</b>
2.1	Introduction . . . . .	27
2.2	LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) . . . . .	27
2.2.1	Fonctionnement de LEACH . . . . .	28
2.2.1.1	Phase de construction (setup phase) . . . . .	28
2.2.1.2	Phase de communication (steady phase) : . . . . .	29
2.2.2	Interférences entre clusters . . . . .	29
2.2.3	Avantages de LEACH . . . . .	29
2.2.4	Inconvénients de LEACH . . . . .	30
2.3	Les Successeurs de LEACH . . . . .	30
2.3.1	LEACH-C (LEACH Centralized) . . . . .	31
2.3.2	TB-LEACH (Time-based Cluster selection LEACH) . . . . .	32
2.3.3	EM-LEACH (Enhanced multi-hop LEACH) . . . . .	32
2.3.4	ALEACH (Advanced LEACH) . . . . .	33
2.4	LEEBSDN (LEACH Energy Effecient Base Station Divided Network) . . . . .	33
2.4.1	Principe et fonctionnement . . . . .	34
2.4.1.1	Phase de construction . . . . .	34
2.4.1.2	Phase de transmission . . . . .	36
2.5	Comparaison entre les différentes variantes de LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) . . . . .	36

2.6 Conclusion . . . . .	37
<b>3 Implémentation</b>	<b>38</b>
3.1 Introduction . . . . .	38
3.2 Aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs . . . . .	38
3.3 Environnement et paramètres de simulation . . . . .	39
3.3.1 Les paramètres de simulation . . . . .	40
3.3.2 Métriques de performances . . . . .	41
3.4 Évaluation des performances et comparaison . . . . .	41
3.4.1 Durée de vie de réseau . . . . .	41
3.4.2 Nombre de nœuds vivants . . . . .	42
3.4.3 Pourcentage des paquets délivrés à la station de base . . . . .	43
3.5 Conclusion . . . . .	45
<b>Conclusion Générale</b>	<b>46</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>48</b>

# Table des figures

1.1	Architecture des RCSF . . . . .	6
1.2	Composition d'un noeud capteur sans fil : exemple d'un noeud M3 de FIT/IoT-Lab . . . . .	7
1.3	Architecture d'un noeud capteur . . . . .	8
1.4	Le fonctionnement d'un capteur . . . . .	9
1.5	Colliers de suivi des animaux . . . . .	15
1.6	Équipements médicales . . . . .	15
1.7	La pile protocolaire dans les RCSFs . . . . .	17
1.8	Les états possible d'un noeud capteur . . . . .	19
1.9	Énergie consommée par un capteur équipé par le transceiver CC2420 . . . . .	20
1.10	Modèle de consommation d'énergie . . . . .	21
1.11	Classification des protocoles de routages . . . . .	22
1.12	Les éléments dans un cluster . . . . .	24
2.1	Protocole LEACH avec deux tours différents . . . . .	29
2.2	Les différentes phases de LEACH . . . . .	30
2.3	La structure de réseau avec le protocole LEEBSDN . . . . .	34
3.1	La durée de vie en fonction de nombres des noeuds . . . . .	42
3.2	Nombre de noeuds vivants en fonction de temps . . . . .	43
3.3	Pourcentage des paquets délivrés à la station de base . . . . .	43
3.4	Fichier de configuration .ini . . . . .	44
3.5	Reste de Fichier de configuration . . . . .	45

# Liste des tableaux

1.1	Énergie de transition en mW exemple de ChipCon CC2420 . . . . .	20
2.1	Comparaison entre les différentes variantes de LEACH . . . . .	36
3.1	Paramètres de simulation . . . . .	40
3.2	Caractéristiques des noeuds capteurs . . . . .	40
3.3	Équipements de manipulation . . . . .	40

# Abréviations

<b>RCSF</b>	<b>Reseaux de Capteurs Sans Fil</b>
<b>WSN</b>	<b>Wireless Sensor Network</b>
<b>ADC</b>	<b>Analog to Digital Convertor</b>
<b>MAC</b>	<b>Medium Access Control</b>
<b>OSI</b>	<b>Open Systems Interconnection</b>
<b>LEACH</b>	<b>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</b>
<b>SN</b>	<b>Sensor Node</b>
<b>BS</b>	<b>Base Station</b>
<b>CH</b>	<b>Cluster Head</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>RSSI</b>	<b>Received Signal Strength Indicator</b>
<b>TB-LEACH</b>	<b>Time Base Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</b>
<b>ALEACH</b>	<b>Advanced Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</b>
<b>EM-LEACH</b>	<b>Enhanced Multi-hop Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</b>
<b>LEEBSDN</b>	<b>LEACH Energy Efficient Base Station Divided Network</b>



# *Résumé*

Le déploiement de nouvelles technologies a poussé les concepteurs de réseaux informatiques à développer une nouvelle architecture de réseau répondant aux besoins des utilisateurs en termes de coût, de facilité de déploiement et de mobilité, ce sont les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Ils sont composés d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, capable de surveiller l'environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil.

Garantir une bonne transmission de données depuis les nœuds capteurs jusqu'à la station de base avec une consommation minimum de l'énergie, nécessite un bon mécanisme de routage. Plusieurs recherches ont été effectuées afin de proposer des stratégies de routages dont certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux tandis que d'autres sont spécialisés pour les réseaux de capteurs. La stratégie la plus adaptée aux RCSFs est la classe de routage hiérarchique qui 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.

Dans ce mémoire nous avons étudié la problématique du routage hiérarchique dans les RCSFs en se focalisant sur le protocole LEACH et ses variants ainsi, la proposition d'une nouvelle solution efficace. Notre contribution consiste en un protocole de routage, dénommé LEEBSDN (LEACH Energy Efficient Base Station Divided Network) qui adopte une organisation des nœuds du réseau selon : la distance qui sépare les nœuds de la station de base, et le nombre de voisins de chaque nœud. Cette approche proposée vise à diminuer la consommation de l'énergie des nœuds les plus éloignés de la station de base. Nous avons aussi programmé les quatre protocoles suivants : LEACH, TB-LEACH, ALEACH et LEEBSDN sous le simulateur OMNET++/INET afin d'effectuer une étude comparative basée sur trois paramètres : la durée de vie de réseau, le nombre des capteurs vivants et le pourcentage des paquets délivrés à la station de base. La simulation a montré que les résultats fournis par notre protocole LEEBSDN sont très compétitifs.

## ***Mots-clés :***

Réseaux de capteurs sans fil, Routage hiérarchique, LEACH et ses variants, Consommation d'énergie, durée de vie.

## *Abstract*

THE deployment of new technologies has pushed computer network designers to develop a new network architecture that addresses the needs of users in terms of cost, ease of deployment and mobility, these are wireless sensor networks (WSNs). They consist of a set of very small devices, called sensor nodes, capable of monitoring the environment and reacting when necessary by sending the collected information to one or more collection points, using a wireless connection.

Ensuring good data transmission from the sensor nodes to the base station with minimum power consumption requires a good routing mechanism. Several searches have been made to propose routing strategies, some of which are adaptations of strategies that existed for other types of networks while others are specialized for sensor networks. The most suitable strategy for RSCFs is the hierarchical routing class that encompasses solutions that adopt a physical network restructuring into a logical hierarchy system, aimed at optimizing energy consumption and scaling up.

In this thesis we have studied the problem of hierarchical routing in the WSNs by focusing on the LEACH protocol and its variants as well as the proposition of a new efficient solution. Our contribution consists of a routing protocol, called LEEBSDN (LEACH Energy Efficient Base Station Divided Network) which adopts an organization of nodes of the network in two levels : according to the distance which separates the nodes of the base station, and the number of neighbors of each node. This proposed approach aims at reducing the energy consumption of the nodes furthest away from the base station. We have also programmed the following four protocols : LEACH, TB-LEACH, ALEACH and LEEBSDN under the OMNET ++ / INET simulator to perform a comparative study based on three parameters : network lifetime, number of live sensors, and percentage of packets delivered to the base station. The simulation showed that the results provided by our LEEBSDN protocol are very competitive.

### ***Keywords :***

Wireless sensor networks, Hierarchical routing, LEACH and its variants, Consumption of energy, lifetime.

# Introduction générale

---

**”Les technologies les plus profondes sont celles qui disparaissent. Ils s’intègrent dans le tissu de la vie quotidienne jusqu’à ce qu’ils ne puissent plus s’en distinguer.”**

—*The Late Mark Weiser Father Of  
Ubiquitous Computing and Chief Technologist of Xerox Parc.*

LES réseaux de capteurs sans fil ont récemment pris de l’importance parce qu’ils ont le potentiel de révolutionner de nombreux segments de l’industrie des télécommunications, notre économie et notre vie, de la surveillance et de la conservation de l’environnement et dans les services de santé. La conception, la mise en œuvre et l’exploitation d’un réseau de capteurs nécessitent la confluence de nombreuses disciplines, y compris le traitement du signal, réseaux et protocoles, systèmes embarqués, gestion de l’information et algorithmes distribués. De tels réseaux sont souvent déployés dans des environnements aux ressources limitées, par exemple avec des nœuds fonctionnant sur batterie qui ne sont pas reliés entre eux [1]. Ces contraintes dictent que les problèmes de réseau de capteurs doivent être abordés de manière holistique, en considérant conjointement les couches physique, réseau et application et en faisant des compromis majeurs de conception entre les couches.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont généralement composés d’un grand nombre de nœuds. Ce sont des micros capteurs capables de recueillir et transmettre les données d’une manière autonome à faible coût, capables d’effectuer des mesures sur l’environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée. Ces derniers peuvent communiquer et collaborent entre eux pour former un réseau de capteurs.

Cependant, ils sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle dans des environnements limités en terme de ressources. Les limites imposées sont la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d’énergie. Ils soulèvent des

# Chapitre 1

## Description des réseaux de capteurs sans fil

---

### 1.1 Introduction

CES dernières années, la conception efficace d'un réseau de capteurs sans fil est devenue un domaine de recherche de pointe. Ce type de réseaux résulte d'une fusion de deux concepts de l'informatique moderne : les systèmes embarqués et les communications sans fil. Un tel réseau regroupe des unités de traitement embarquées à faibles ressources (capacité de calcul, mémoire, batterie) communiquant sans fil dans une zone géographique. Son but principale est pour observer et contrôler des phénomènes physiques ou environnementales tels que : la température, la pression de l'atmosphère, la lumière...etc. Ces derniers sont acheminés vers des points responsables de traitement de données et de leurs distribution sur les stations utilisatrices. Grâce au bas prix et la petite taille des nœuds capteurs leur déploiement a connu un large succès dans plusieurs domaines, ils sont intégrés dans les équipements médicale, dans les maisons comme outils de sécurité, utilisé pour surveiller l'environnement et les animaux, ils sont largement employés dans le domaine militaire. Dans ce chapitre nous présentons les réseaux de capteurs sans fil, l'architecture des capteurs, leurs caractéristiques, leurs applications et quelques contraintes et challenges, ainsi on va présenter des généralités sur la notion de routage et de consommation d'énergie dans les RCSFs.



## 1.2 Définition des RCSF's

Un réseau de capteurs sans fil (en anglais Wireless Sensor Network (WSN)), est un réseau sans fil constitué d'un grand nombre de dispositifs autonomes répartis dans l'espace qui utilisent des capteurs pour surveiller les conditions physiques ou environnementales. Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données capturées vers un nœud collecteur appelé nœud puits (Sink en anglais) [2]. Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet, un satellite ou un autre système.

## 1.3 Architecture de communication d'un RCSF

La structure d'un RCSF (Figure 1.1) est dynamique. Les nœuds capteurs sont distribués d'une façon aléatoire dans une zone géographique appelée zone de captage. Les nœuds capteurs sont organisés sur une surface où chaque nœud préserve une courte distance vers les autres nœuds. Les données capturées sont traitées, puis envoyées vers le(s) nœud(s) puits (ou station de base), ce dernier est une passerelle reliée à internet ou à d'autres réseaux. Un entrepôt de données ou un autre service de stockage peut être présent à la passerelle. L'utilisateur accède à distance aux données capturées à travers un nœud appelé le nœud directeur de tâche qui est relié au RCSF à travers le nœud puits.

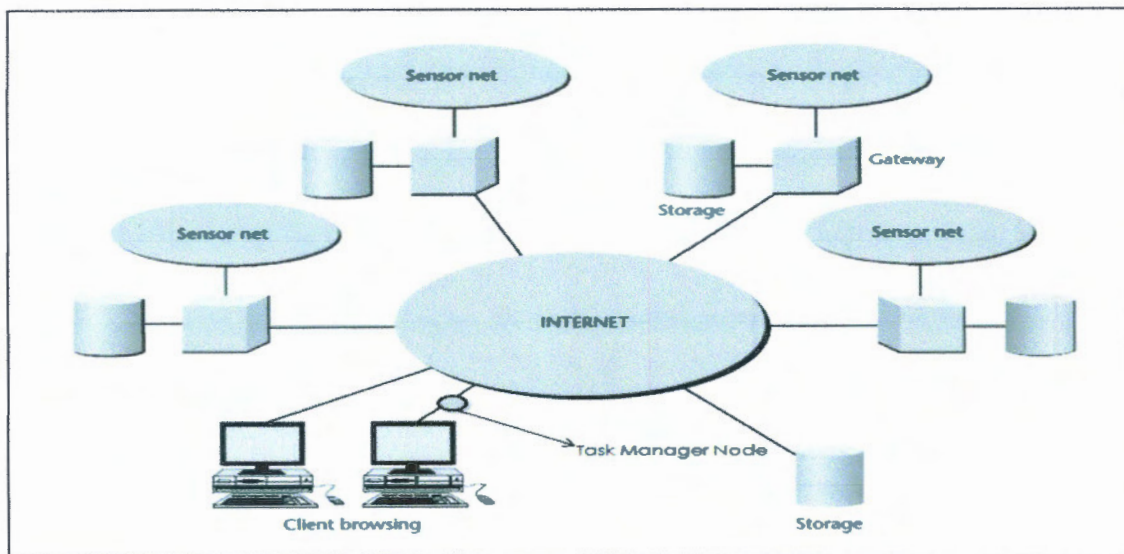


FIGURE 1.1: Architecture des RCSF

## 1.4 Description d'un nœud capteur

### 1.4.1 Définition d'un nœud capteur

Un nœud capteur est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base [3]. Les nœuds capteurs sont dotés d'une batterie à faible énergie, ils analysent une considérable quantités des données et les transfèrent sous forme d'une énergie appelé signaux, ils sont généralement de nature électrique ou pneumatique. Ces signaux seront amplifiés afin d'atteindre les autres nœuds et ainsi pour transmettre les données au nœud puits en suivant une communication multi-saut. La Figure 1.2 illustre la forme d'un nœud capteur.

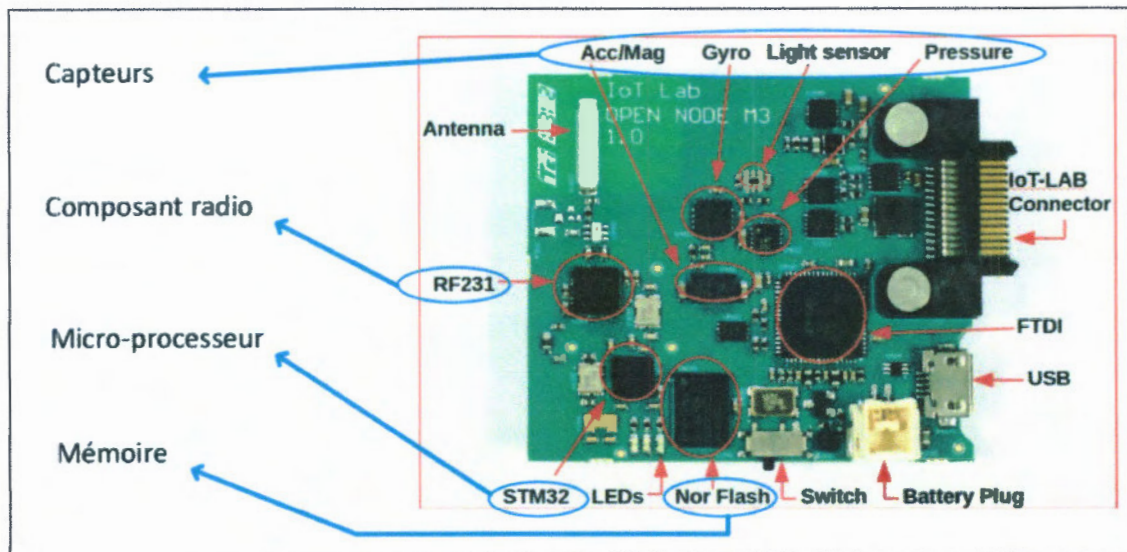


FIGURE 1.2: Composants d'un nœud capteur sans fil : exemple d'un nœud M3 de FIT/IoT-Lab [4].

### 1.4.2 Architecture de base d'un nœud capteur

Un nœud capteur est composé de quatre éléments principaux :

- ✓ **Unité de capture (Sensing unit)** : Appelée aussi unité d'acquisition elle est en charge de capturer les données, elle est divisée en deux éléments :
  - Le capteur qui récupère les données sous forme des signaux analogiques.
  - Un convertisseur (ADC) qui convertit les données analogiques du capteur en données numériques.

✓ **Unité de traitement (Processing unit) :** Regroupe :

- Le processeur.
- Une unité de mémoire réduite.

Cette unités a comme rôle le stockage ainsi que le traitement des données.

✓ **Unité émetteur/récepteur (Transceiver Unit) :** Permet de relier le nœud capteur au réseau en utilisant les ondes radio.

✓ **Unité d'énergie (Power unit) :** Elle représente la source de l'énergie de nœud capteur. Souvent une petite batterie qui est ni rechargeable ni remplaçable.

Le schéma (Figure 1.3) illustre l'architecture de base d'un nœud capteur. En plus de quatre unités décrits ci-dessus, un nœud capteur dispose aussi d'une unité de mobilité qui lui permet d'être mobile et d'un système de localisation.

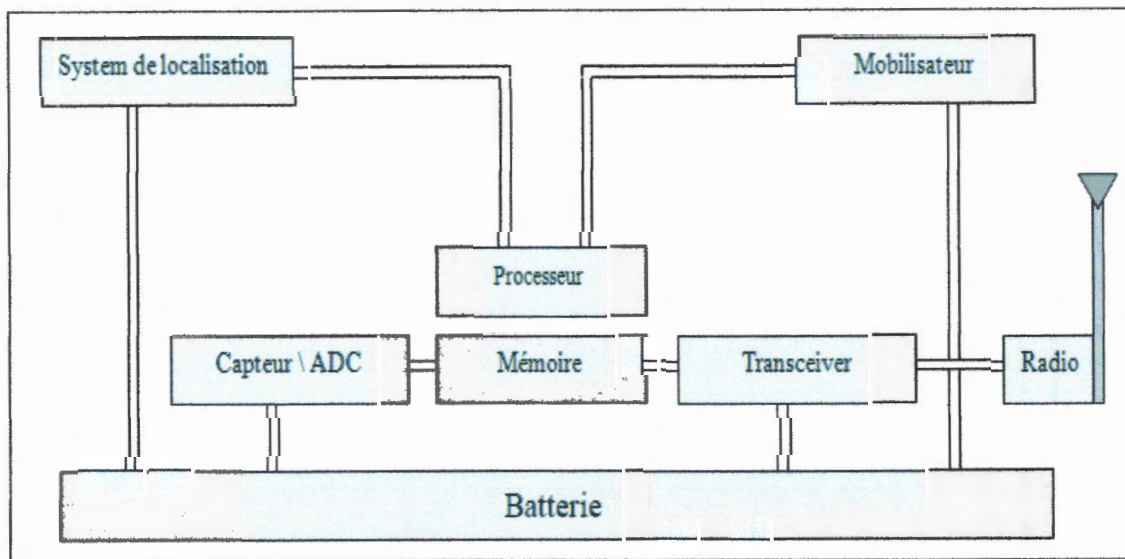


FIGURE 1.3: Architecture d'un nœud capteur

## 1.5 Caractéristiques des nœuds capteurs

Les caractéristiques principales d'un nœud capteur sont les suivants :

- ✓ **Petite taille :** Les nœuds capteurs sont des équipements très petits. Cette taille permet de les intégrer dans des machines, de les déployer dans des emplacements spécifiques.
- ✓ **Ressources matérielles limitées :** Les nœuds capteurs sont équipés par une mémoire et un processeur avec des capacités de stockages et de traitement limités.



- ✓ **Capacité énergétique limitée** : Les nœuds capteurs sont alimentés par une batterie avec une énergie limitée.
- ✓ **Taux élevé de pannes** : Les nœuds capteurs sont soumis à des pannes en raison d'environnements de déploiement difficiles et d'opérations sans surveillance.
- ✓ **faible coût** : Le coût est raisonnable d'un nœud capteur.

## 1.6 Fonctionnement d'un capteur

Un capteur permet d'élaborer à partir d'une grandeur physique (température, pression, force,...ect), une autre grandeur physique souvent électrique (signal analogique ou signal numérique) (Figure 1.4).

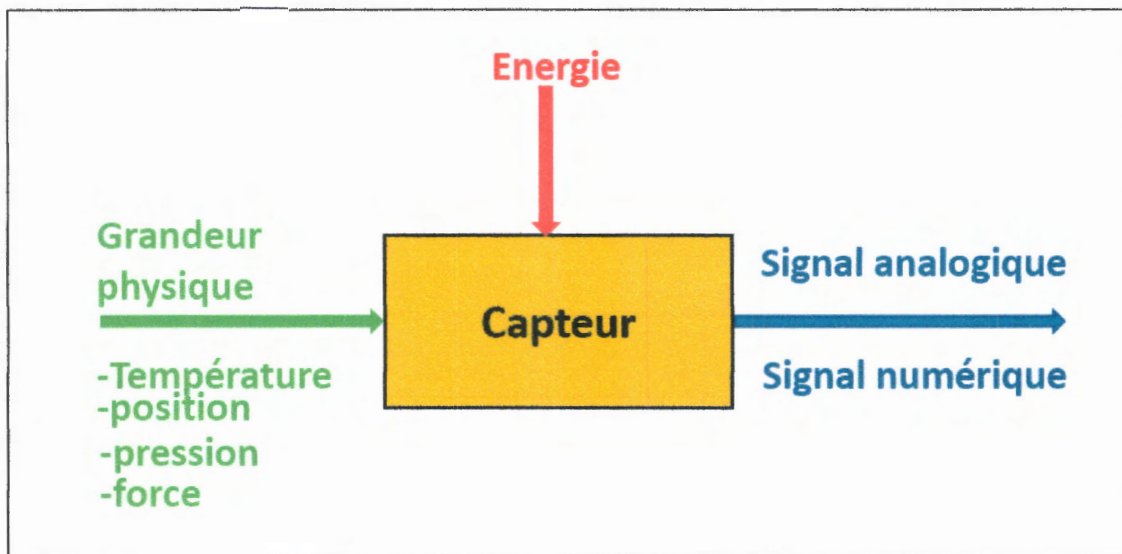


FIGURE 1.4: Le fonctionnement d'un capteur

## 1.7 Caractéristique d'un capteur

Le choix d'un capteur est basé sur ses performances en terme des mesures apportés sur les grandeurs physiques. Dans cette section on note quelques caractéristiques qui définissent la qualité d'un capteur :

- **Bande passante** : Est la gamme de fréquence pour laquelle le capteur fonctionne.
- **Sensibilité** : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée. Un capteur idéal a une sensibilité constante.

- **Finesse** : Permet d'évaluer la perturbation introduite par le dispositif de mesure.
- **La sélectivité** : La capacité du capteur à mesurer une propriété cible en présence d'autres propriétés. Par exemple, si un capteur d'oxygène ne réagit pas à d'autres gaz tels que le CO<sub>2</sub>, il possède une bonne sélectivité.
- **Linéarité** : Si la sensibilité du capteur est constante pour la plage, on l'appelle linéarité du capteur. Les capteurs linéaires sont plus faciles à utiliser tandis que les capteurs non linéaires nécessitent des équations mathématiques complexes pour mesurer la grandeur physique.
- **Étendue de mesure pleine échelle** : L'étendue de mesure est la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure de la grandeur mesurable par un capteur.

## 1.8 Communications dans les RCSFs

Les nœuds capteurs sont équipés d'un médium radio et une antenne au niveau d'unité de capture. Comme indiqué précédemment cette unité est le lien de communication des différents capteurs. La communication entre les nœuds est alors établie par le baie des ondes radio. Ces communications sont donc soumises à des facteurs qui influencent la portée et la puissance des ondes tel que décrit ci-dessous. Alors seul les nœuds suffisamment proche peuvent communiquer directement, Une communication à longue distance peut s'effectuer en adaptant le mécanisme de multi-saut. Les nœuds intermédiaires doivent se collaborer pour transporter un message vers sa destination.

### 1.8.1 Caractéristiques de la radio

- ✓ **La fréquence** : Elle désigne le nombre d'oscillations d'un phénomène périodique par unité de temps(seconde), mesurée en Hertz (*HZ*). Elle est calculée par la formule suivante :

$$f = 1/T. \quad (1.1)$$

*T* : est une période de temps mesurée en seconde (*s*).

- ✓ **La longueur d'onde** : Elle définit la distance séparant deux valeurs maximales consécutifs de l'amplitude. Elle se mesure en mètre (*m*).

$$\lambda = c/f. \quad (1.2)$$

$c$  : est la vitesse d'onde en  $m/s$ . La longueur d'onde radio est généralement égal à  $10^3 m$ .

- **Amplitude** : Indique la hauteur de l'onde. Le codage de la plus petite égale à 0 et la plus haut égal à 1.
- ✓ **La porté** : La porté d'un signal radio dépend principalement de son puissance de transmission et la sensibilité de récepteur .
  - **La puissance de transmission** : L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Si la puissance de transmission est élevée le signal aura une grande porté, en conséquent une consommation d'énergie très élevée. La puissance est étroitement liée à la distance entre l'expéditeur et le destinataire. Plus la distance entre les deux extrémités est grande, moins il y a de puissance de transmission et vice versa. La puissance s'exprimes en déciBel ( $dB$ ).
  - **La sensibilité** : Pour que le signal reçu soit intelligible pour le récepteur, il faut que celui-ci ait une sensibilité suffisante. La sensibilité est la variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

$$\Delta S = S \Delta M. \quad (1.3)$$

$\Delta M$  : La variation dans la grandeur à mesurer.

$\Delta S$  : La variation dans la grandeur de sortie .

$S$  : La sensibilité du capteur.

### 1.8.2 Propagation de signal Radio

Le mouvement et déplacements des vagues dans l'espace est reconnu par le phénomène de propagation des ondes. Ce derniers est subit de plusieurs distorsions. Différents facteurs sont acteurs à ces distorsions. Dans cette section on va citer les facteurs les plus importants :

- ✓ **Atténuation** : Ce processus diffuse l'énergie de la vague dans un espace plus grand [5]. C'est comme si vous criez dans une caverne et que l'écho de votre voix commençait à s'estomper jusqu'à ce qu'il ne soit plus entendu. Avec une distance plus large, la puissance de l'onde se diminue et le signal devient difficile de capté.
- ✓ **Réflexion / réfraction** : Décrit le changement de direction de l'onde quand elle rencontre une surface. Il se produit en raison de la présence de bons réflecteurs tels que le métal ou le verre. Il conduit non seulement à l'effet de trajets multiples, mais aussi à l'augmentation du bruit et des interférences du canal.

- ✓ **Diffraction / diffusion** : Est le comportement des ondes lorsqu'elles rencontrent un obstacle. Le phénomène peut être interprété par la diffusion d'une onde par les points de l'objet. La diffusion de ses ondes secondaires introduit le problème de différencier le signal original de ses ondes secondaires au niveau des capteurs récepteurs.

Tous ces processus mènent à ce que les chercheurs résumant comme une perte de chemin. **La perte de trajet** ou encore **path loss** est la réduction de la densité de puissance d'une onde électromagnétique lorsqu'elle se propage dans l'espace [5].

## 1.9 Difficultés et contraintes

De nombreux problèmes doivent être résolus pour que les RCSFs fonctionnent efficacement dans la pratique. Les principaux challenges sont les suivants :

### 1.9.1 Consommation d'énergie

L'une des contraintes les plus importantes dans les RCSFs est l'exigence de faible consommation d'énergie par le nœud capteur. Les capteurs sont équipés par une batterie avec une source d'énergie limitée. Ces batteries souvent non remplaçable ni rechargeable contrairement de réseaux sans fil traditionnel où le rechargement des batteries des équipements sans fil est très facile, tel que les téléphones portable. Dans un réseau de capteurs, chaque nœud collecte des données et transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques capteurs ou la mort de son batterie nécessite une modification de la topologie du réseau et un ré-acheminement des paquets. Toutes ces opérations consomment beaucoup d'énergie, C'est pourquoi la recherche actuelle se concentre principalement sur le développement des algorithmes et des protocoles ayant comme but l'économie d'énergie.

### 1.9.2 La durée de vie

C'est la durée pendant laquelle le réseau reste opérationnel. On s'attend à ce que le RCSF puisse fonctionner au moins pendant le temps requis pour accomplir la tâche donnée. Néanmoins, la définition de la durée de vie dépend de l'application du RCSF et elle est en relation directe avec le fonctionnement efficace du réseau [6]. Les nœuds capteurs sont équipés par des ressources limités de calcul et de stockage ainsi qu'une énergie non renouvelable. Ceci induit de nombreux problèmes, en particulier comment maintenir un niveau opérationnel du réseau le plus longtemps possible. La principale préoccupation



des chercheurs est de minimiser la consommation d'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau tout en offrant une qualité de service acceptable.

### **1.9.3 La connectivité**

Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si, il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds [7]. La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. La perte de connectivité entre les nœuds due à la défaillances des nœuds, les attaques et principalement le changements de topologie du réseau,...etc, peut engendrer le partitionnement de la totalité du réseau, la perte de liens, l'isolement des nœuds,...etc. La topologie du réseau change fréquemment à cause d'ajout des nœuds ou mobilité des autres dans le cas des capteurs robots ou à cause des facteurs naturel : vente, ce que affecte la connectivité de réseau.

### **1.9.4 La sécurité**

La sécurité peut être critique dans les RCSFs. Le réseau doit permettre la détection des intrusions et assurer un fonctionnement robuste dans le cas de défaillance parce que, souvent, les nœuds capteurs ne sont pas protégés contre les mauvaises manipulation ou attaques[6]. Les nœuds capteurs sont de petite taille et de faible puissance. Ils effectuent rapidement et facilement des opérations léger. Ce qui posent un problème surtout dans le domaine militaire ou un haut niveau de sécurité est requis et le besoin d'algorithmes cryptographiques est nécessaire, ces derniers doivent tenir compte des ressources limite des RCSFs.

### **1.9.5 Environnement**

Les nœuds capteurs peuvent être déployés à proximité ou à l'intérieur du phénomène observé. Ils sont soumis à différentes conditions d'environnement : haute pression au fond de l'océan, dans les champs de bataille, des tornades, des surfaces contaminées biologiquement ou chimiquement, attachés à des animaux,...etc. Par conséquent, ils doivent fonctionner sans surveillance et pouvoir s'adapter dans des conditions environnementale hostiles.

### **1.9.6 Agrégation de données**

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception

par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'utilisation de l'agrégation de donnée nommé aussi fusion des données est une solution fiable au problème de redondances des informations [8].

### 1.9.7 Bande passante limitée

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les noeuds, les noeuds capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de  $Kb/s$ . Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes [9].

## 1.10 Les applications des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent avoir beaucoup d'applications. Parmi elles, nous citons :

### 1.10.1 applications militaires

Grâce à l'auto-organisation, tolérance aux pannes, la rapidité d'installation des capteurs et leurs petite taille qui permet leurs déploiement dans des endroits à accès difficile, comme les champs de bataille, les RCSFs atteint un succès remarquable dans ce domaine. Les capteurs aident facilement à la détection des mouvements hostiles, l'analyse des conditions environnementale, biologiques ou radiations dans certain terrain avant d'envoyer des troupes.

### 1.10.2 Applications environnementales

Les capteurs sont généralement utilisés pour contrôler le mouvement des animaux, l'observation de comportement de certain espèces, l'étude des phénomènes naturels et la détection d'incendie de forêt,...etc. L'une d'applications remarquable des capteurs dans ce domaine est la surveillance des animaux, leurs comportement, leurs santé le tout en temps réel est l'utilisation des colliers de suivi (Figure 1.5). Ces colliers intégrant des capteurs est l'un des outils utilisés pour surveiller le déplacement des animaux, ils recueillent la position par GPS et la transmettent vers l'utilisateur.



FIGURE 1.5: Colliers de suivi des animaux

### 1.10.3 Applications médicales

Les capteurs jouent un rôle de plus en plus important dans la technologie médicale dans le but de rendre les dispositifs médicaux encore plus efficaces et sécurisés, tout en simplifiant leur fonctionnement. Parmi les applications réussies de capteurs en technologie médicale on cite (Figure 1.6) :

- Appareils respiratoires.
- Dispositifs de diagnostic du sommeil.
- Appareils de mesure de la glycémie.
- Appareils d'anesthésie.



FIGURE 1.6: Équipements médicales

### 1.10.4 Applications industrielles

Les capteurs sont utilisés pour surveiller la fabrication des équipements et leurs états par exemple : les raffineurs de pétrole peuvent utiliser des capteurs pour surveiller l'état de leurs kilomètres de pipelines. Ils sont également intégrés dans des machines dans des endroits inaccessibles aux être humains, afin de détecter tout dysfonctionnement. En cas de panne, ces capteurs aident à détecter et à résoudre le problème rapidement sans coûter cher.



### 1.10.5 Applications domotique

La domotique vise à apporter des solutions techniques pour répondre aux besoins de confort dans les bâtiments par le contrôle des différents systèmes et sous-systèmes des maisons ou des entreprises tel que : les systèmes de refroidissement, de chauffage, la sécurité,...etc. L'application principale des capteurs dans ce domaine est la sécurité. Ils sont adaptés dans les systèmes de vérification d'empreintes digitales par exemple : les capteurs optiques, les capteurs ultrasoniques,...etc. Ces capteurs sont souvent doublés d'une mesure visant à établir la validité de l'échantillon soumis (autrement dit, qu'il s'agit bien d'un doigt). Une autre utilité des capteurs est le scanner des iris : L'individu se place en face du capteur (caméra CCD/CMOS) qui scanne son iris. Ces capteurs permettent aussi d'activer ou de désactiver le système d'alarme plus rapidement sans la présence d'un code clé ou d'autre informations. Ils sont placés aux différentes entrées de la maison et permettent un accès sécurisé vers l'intérieur en ne permettant qu'aux personnes autorisées d'y entrer. Les capteurs sont aussi utilisés pour contrôler certaines mesures tel que la température de la maison, les systèmes d'alimentation éclectiques.

### 1.11 La pile protocolaire dans les RCSFs

Un modèle de communications est établi afin de standardiser les communications entre les différents composants du réseau de capteur. Ce modèle comprend cinq couches qui jouent le même rôle que celui du modèle OSI, ainsi de trois plans de gestion : plan de gestion de l'énergie, plan de gestion de mobilité et plan de gestion des tâches (voir Figure 1.7). Dans ce qui suit nous présentons un résumé sur les fonctionnalités principales de chaque couche.

#### 1.11.1 Plan de gestion d'énergie

La tâche assurée au niveau de ce plan est la gestion de l'énergie consommée par le nœud capteur. Dans le cas d'une réception dupliquée d'un message cette couche est responsable de la fermeture de l'interface de réception pour éviter de recevoir le même message depuis le même nœud plusieurs fois. Elle gère aussi des informations de routage en cas où l'énergie restante ne permet pas à la contribution de l'acheminement d'un paquet. Cette couche diffuse un message informative pour ne pas participer au routage.

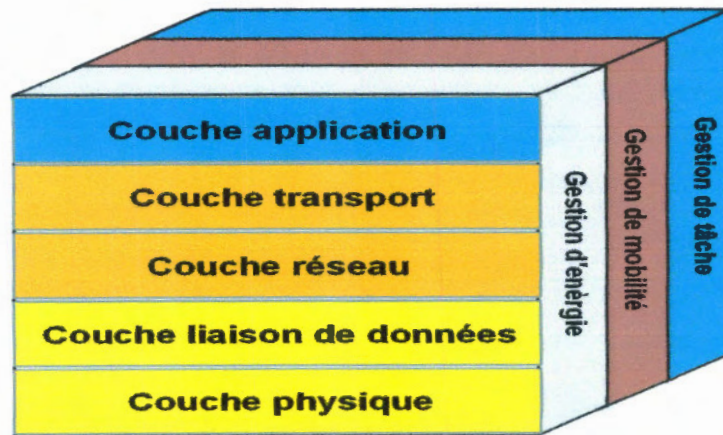


FIGURE 1.7: La pile protocolaire dans les RCSFs

### 1.11.2 plan de gestion de mobilité

Ce plan gère la sauvegarde de toutes les mouvements, la liste des nœuds voisins et les routes vers les utilisateurs finals afin d'améliorer les performances de réseau et de conserver l'énergie de nœud capteur.

### 1.11.3 Plan de gestion de tâche

Lors d'une opération de captage dans une zone géographique donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend de plusieurs paramètres tels que la nature du capteur, le niveau d'énergie et la zone dans laquelle il a été déployé. À cette fin, ce niveau d'équilibrage et de distribution des tâches sur les différents nœuds a comme but d'assurer un travail coopératif et efficace [10]

### 1.11.4 Couche application

La couche application assure principalement l'interface avec les applications, elle s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, gérée directement par les logiciels.

### 1.11.5 Couche de transport

Chargée de transport des données, du contrôle de flux, de leurs découpage en paquets et la conservation de leurs ordres.

### 1.11.6 Couche réseau

La couche réseau permet la communication de bout à bout entre deux noeuds. Elle établit les routes entre les noeuds capteurs et le noeud puits et sélectionne le meilleur chemin en terme d'énergie, de nombre de sauts, de délai de transmission, de débit,...etc

### 1.11.7 Couche liaison des données

Elle est responsable du multiplexage des flux de données, la détection des trames de données, du contrôle d'accès au médium et de contrôle d'erreurs.

### 1.11.8 Couche physique

Elle est responsable de la modulation et du codage des données. Elle se charge également de la sélection de la fréquence et de la génération de la fréquence de l'onde porteuse.

## 1.12 Les états possible d'un capteur

En générale, un noeud capteur peut passé par cinq états différents dans son fonctionnement (Figure 1.8)

- **État Off** : Le capteur est inactif dans sa totalité (radio , mémoire, processeur ...).
- **État actif (idle)** : Dans un état actif seul la radio est active .Le capteur écoute le canal radio pour recevoir des paquets possibles alors qu'aucun paquet n'est envoyé sur le réseau. Dans ce cas le noeud restera longtemps en écoute, ce qui entraînera un gaspillage d'une grande quantité d'énergie.
- **État sommeil (sleep)** : Dans ce mode, la radio est mise hors tension.
- **État transmission (Tx)** : Lors de transmission de données.
- **État réception (Rx)** : Lors de réception de données.

## 1.13 Consommation d'énergie

L'énergie est une ressource précieuse qui influe directement sur la durée de vie du capteur et du réseau. Ceci à cause de la limitation de la capacité énergétique des batteries qui alimentent les capteurs. Maximiser la durée de vie du réseau revient donc à réduire la consommation énergétique des noeuds. Les capteurs utilisent leur énergie pour réaliser trois actions principales : la capture, le traitement des données et la communication [11].



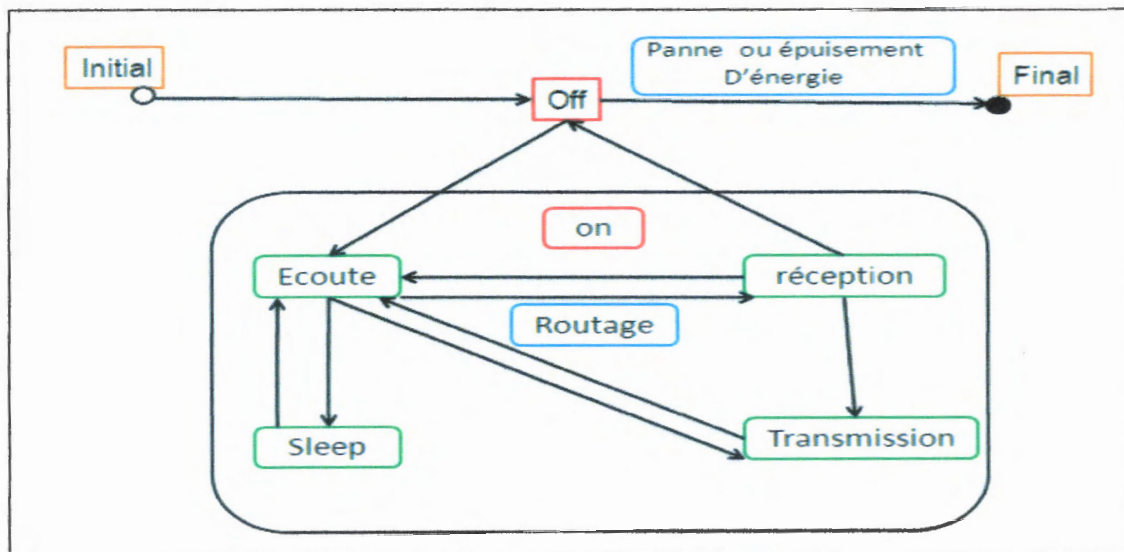


FIGURE 1.8: Les états possible d'un nœud capteur

### 1.13.1 Énergie de capture

La capture est effectuée par les composants d'acquisition qui traduisent les phénomènes physique en signal électrique. Elle dépend de la spécificité du capteur. Généralement, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par les autres modules (Figure 1.9).

### 1.13.2 Énergie de traitement

Elle concerne deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée en exécutant un logiciel. D'autre part l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication (Figure 1.9).

### 1.13.3 Énergie de communication

Elle est divisée en deux parties : l'énergie dépensée durant la transmission de données (TX) et celle de la réception de données (RX). Cette énergie dépend non seulement de la quantité des données à transmettre (taille des paquets) mais également de la distance entre l'émetteur et le récepteur et le type du module de communication utilisé. En effet, la portée d'un signal dépend non seulement de sa puissance d'émission mais également des propriétés physiques du milieu de propagation. Cependant, la puissance d'émission influe grandement sur la portée du signal. Ainsi, lorsque la puissance d'émission est

élevée, le signal aura une grande portée, et par conséquent l'énergie consommée sera plus importante [12]. La plus grande proportion d'énergie consommée est par l'unité de communication (Figure 1.9).

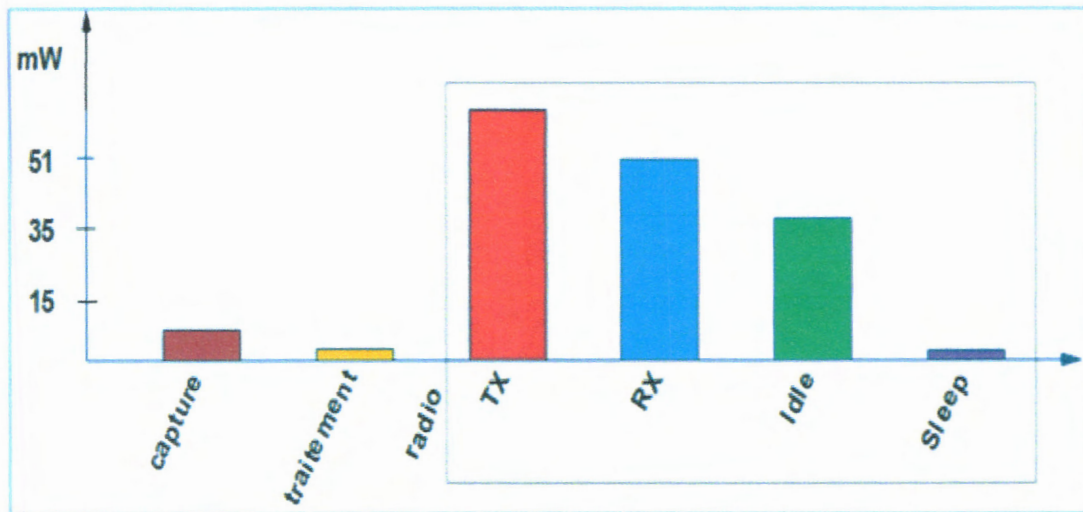


FIGURE 1.9: Énergie consommée par un capteur équipé par le transceiver CC2420

### 1.13.4 Énergie de transition

La transition entre les différents états de module radio (RX, TX, Idle, Sleep) induit aussi une énergie appelée énergie de transition même si elle est relativement faible. Le tableau suivant illustre la quantité d'énergie consommée lors de la transition d'un état vers un autre dans le cas d'un module radio de type CC2420 :

	RX	TX	Sleep
RX	0	22.2	0.5
TX	22.2	0	0.5
Sleep	22.2	0	0

TABLE 1.1: Énergie de transition en mW exemple de ChipCon CC2420

A noter que l'énergie dissipé dans l'états idle est la même dans l'état TX.

## 1.14 Modèle de consommation d'énergie

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués dans le domaine de la radio à faible consommation énergétique. Heinzelman et al. [11] ont proposé un modèle (Figure 1.10) où la radio absorbe  $E_{elec} = 50nJ/bit$  pour exécuter des circuits émetteur /récepteur et

$E_{amp} = 100\text{bit}/m^2$  pour l'amplificateur de transmission.

Ainsi, pour transmettre un message de  $s$  bits sur une distance  $d$ , la radio dépense :

$$E_{Tx}(s, d) = E_{elec}(s) + E_{amp}(s, d) \quad (1.4)$$

$$E_{Tx}(s, d) = s \times E_{elec} + s \times E_{amp} \times d^n \quad (1.5)$$

Pour recevoir un message de  $s$  bits le récepteur consomme :

$$E_{Rx}(s) = E_{elec}(s) \quad (1.6)$$

$$E_{Rx}(s) = s \times E_{elec} \quad (1.7)$$

Où :

$E_{elec}$  : représente l'énergie de transmission électronique.

$E_{amp}$  : représente l'énergie d'amplification.

$n$  prendre la valeur 2 ou 4 selon la distance de transmission.

La figure suivante illustre ce modèle de consommation d'énergie.

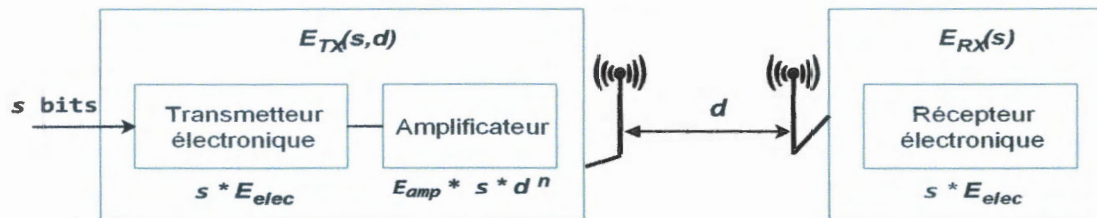


FIGURE 1.10: Modèle de consommation d'énergie

## 1.15 Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le réseau de capteurs est composé d'un grand nombre de nœuds déployés sur une large surface, où tous les nœuds sont connectés entre eux. En effet, l'échange de données est effectuée sous forme de communications à sauts multiples.

Lors de la réception d'une requête par un capteur source de donnée, ce dernier et en s'appuyant sur une algorithmes de routage achemine les paquets vers le nœud Sink. Les algorithmes de routage utilisés par les protocoles de routage doivent prendre en considération les caractéristiques des nœuds capteurs pour sélectionner les routes qui respectent les critères essentielles d'une communication fiable : temps aller/retour des paquets, taux de perte des paquet, débit etc. Concevoir et développer des protocoles de

Le routage dans le cadre des applications des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) présente un apport considérable pour améliorer les performances des réseaux et d'accroître leur durée de vie. Plusieurs contraintes doivent être prises en compte [12] :

- ☛ contraintes énergétiques.
- ☛ bande passante limitée.
- ☛ absence d'adressage global.
- ☛ redondance des données.
- ☛ réseau à sources multiples et destination unique.
- ☛ gestion des ressources.
- ☛ capacités de stockage limitées.
- ☛ capacités de calcul limitées.

Récemment, les protocoles de routage pour les RCSF ont été largement étudiés, et différentes études ont été publiées. Les méthodes employées peuvent être classifiées suivant plusieurs critères comme illustré sur la figure 1.11

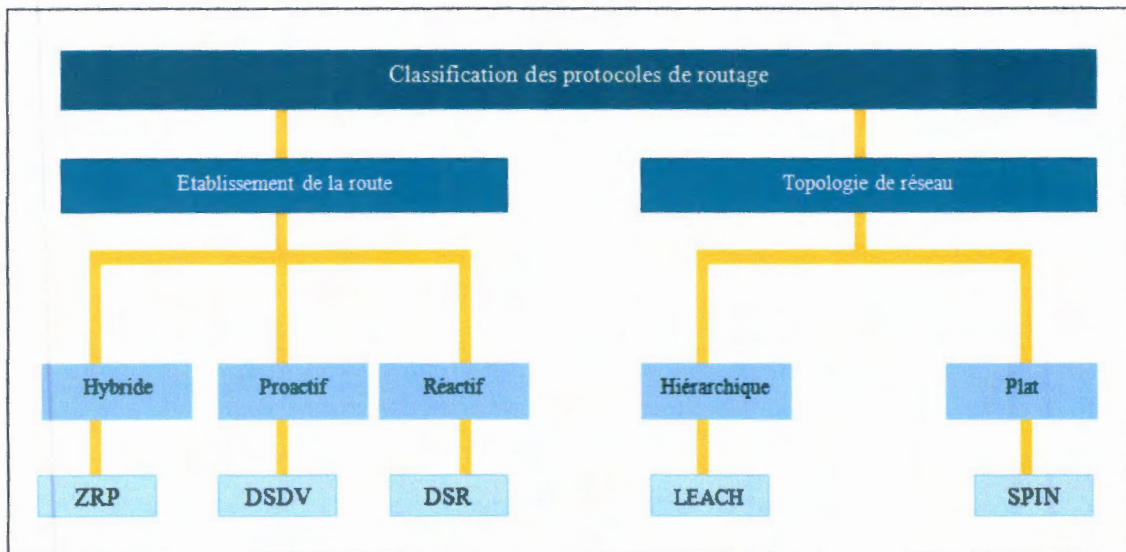


FIGURE 1.11: Classification des protocoles de routages

\* **Protocole de routage basé sur la topologie de réseau** : désigne la façon d'organisation des nœuds de réseau, deux topologies sont connus :

- ✓ **Plat** : Tous les nœuds sont identiques en termes de ressources et ont le même rôle à jouer dans le réseau.



- ✓ **Hierarchique** : Le réseau est divisé en des groupes des noeud appelé Clusters, chaque cluster a son propre chef (leader en anglais). Cette topologie est adaptée afin d'augmenter la scalabilité du système.
  
- \* **Protocole de routage basé sur l'établissement de la route** : Suivant la manière de création des routes lors de routage.
  - ✓ **Protocoles proactifs** : Ces protocoles de routage essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque noeud du réseau.
  
  - ✓ **Protocoles réactifs** : Créent et maintiennent des routes selon les besoins (routage a la demande ).
  
  - ✓ **Protocoles hybrides** : Ces protocoles combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone du voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

### 1.15.1 Les protocoles de routage hiérarchique

Dans les protocoles de routage hiérarchiques, les noeuds organisent le réseau en un ensemble de clusters (voir Figure 1.12). Chaque cluster est géré par un Cluster-Head (CH) sélectionné [13]. Le CH collecte périodiquement les données des noeuds membres de leur cluster, les compresse puis élimine les doublons parmi les données collectées pour réduire le nombre de transmissions entre le cluster-head et la station de base [14].

#### 1.15.1.1 Les éléments d'un cluster

- ✓ **Noeud capteur (Sensor Node : SN(s))** : L'ensemble des capteurs présents dans le réseau, conçus pour détecter et collecter les données.
  
- ✓ **Cluster Head : CH** : Une passerelle entre les SNs et la station de base (BS). Le CH est considéré comme puits des noeuds d'un même cluster.
  
- ✓ **Station de base (Base Station : BS)** Est le point de traitement de données reçues des CHs, où l'utilisateur final accède aux données. La BS représente le puits des CHs (Figure 1.12).

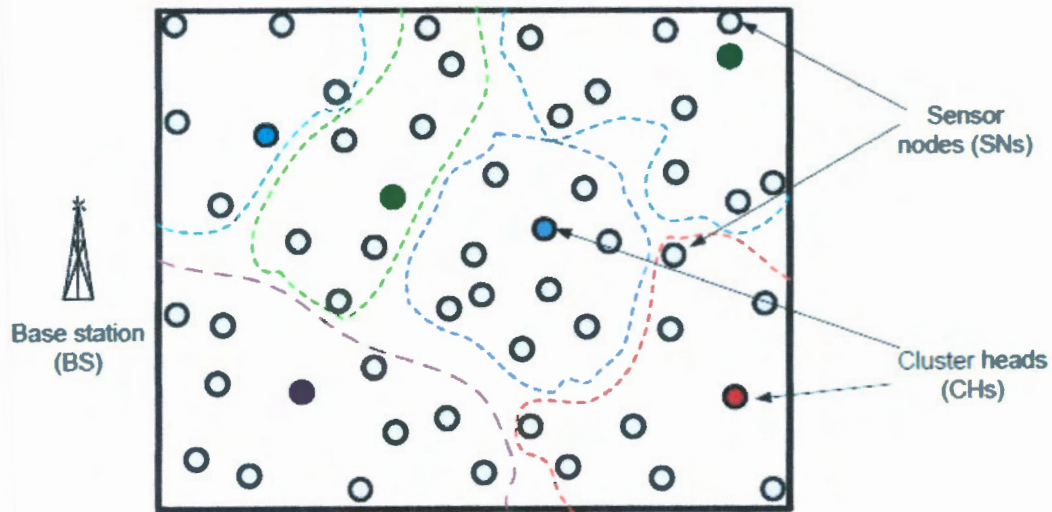


FIGURE 1.12: les éléments dans un cluster

### 1.15.1.2 La classification des clusters

Il existe plusieurs manières pour classifier les clusters. On peut les classer on se basant soit sur les fonctionnalité et les caractéristiques des nœuds, soit sur la forme des clusters.

✦ **Selon les caractéristiques et la fonctionnalité des nœuds** : Dans cette classification, les clusters sont organisés selon les caractéristiques des nœuds et leurs rôle. On distingue deux types de clusters : les clusters homogènes et les clusters hétérogènes.

- ✓ **Cluster homogène** : Dans ce type de cluster, tous les nœuds ont les mêmes caractéristiques, le même niveau d'énergie, la même capacité de calcul et le rôle de CH est périodiquement tournée entre tous les nœuds.
- ✓ **Cluster hétérogène** : Dans ce type de cluster, les nœuds n'ont pas les même caractéristiques. Il peuvent avoir des nœuds puissant en terme d'efficacité énergétique et le rôle de CH est attribué au nœuds puissant.

✦ **Selon la forme de cluster** : Cette classification se base sur la méthode de formation des clusters soit d'une façon dynamique ou statique.

- ✓ **Cluster statique** : Dans ce type, les clusters sont formés lors de déploiement du réseaux. Le choix de CH et le déploiement des membres de cluster et son taille sont tous statique.
- ✓ **Cluster dynamique** : Dans ce type, les nœuds peuvent changer leurs appartenance a un clusters a tous moments.

### 1.15.1.3 processus d'établissement des clusters

Dans tous les protocoles de routage hiérarchique, trois phases principales peuvent être identifiées au cours du processus d'établissement du clustering : la phase d'élection du CH, la phase de formation de cluster et la phase de transmission des données (phase de communication).

- ✓ **Phase d'élection de CH** : Dans cette phase, chaque nœud diffuse périodiquement ses informations aux nœuds qu'ils sont capables de le détecter pour former une base d'information. En se basant sur cette dernière, les CHs seront sélectionnés. Le rôle de CH est généralement d'agréger et de transférer les données collectées par ces membres à la station de base.
- ✓ **Phase de formation de cluster** : La phase de formation des clusters est une phase de collecte d'informations et de prise de décision du rôle à jouer par chaque nœud. La durée de cette phase mesurée en nombre de tours qui demeure une métrique importante et représente un coût considérable dans un algorithme de clusterisation.
- ✓ **Phase de transmission** : Dans cette phase, Les nœuds communiquent leurs données vers les CHs correspondant pendant un intervalle de temps prédéfini. Les données perçues au niveau de chaque CH sont agrégées puis transmises directement vers la SB.

### 1.15.1.4 Méthodes de formation des clusters

Les clusters peuvent être formés par l'une des approches suivantes [15] :

- **Méthode probabiliste** : Les méthodes probabilistes font appel au hasard dont chaque nœud du réseau calcule une probabilité pour participer au processus de sélection de CH et de formation de cluster.
- **Par phase d'élection** : Tous les nœuds échangent périodiquement entre eux leurs informations en formant une base de connaissance. En se basant sur cette base les CH sont élus et les cluster sont formés.
- **Assigné par la station de base** : Dans ce type des méthodes, la station de base se charge de processus de sélection des CHs et de formation des clusters.

## 1.16 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil sont devenus un domaine très intéressant pour les chercheurs. Ils sont déployés partout dans les domaines militaire, environnemental, médicale...etc.

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue générale sur les réseaux de capteurs sans fils, avec leurs principales caractéristiques, problématiques et défis. On va présenter dans le prochain chapitre le protocoles de routage LEACH et quelques de ses variants, Ainsi une description détaillée de notre solution proposée.



## Chapitre 2

# LEACH et ses variants

---

### 2.1 Introduction

Le routage des données dans un RCSF représente la fonctionnalité la plus importante du réseau. Elle doit prendre en considération toutes les caractéristiques des capteurs afin d'assurer les meilleures performances du système : durée de vie, fiabilité, temps de réponse, ...etc. De nombreuses approches de routage ont été proposées dans la littérature, la plus utilisée est l'approche de routage hiérarchique, dans laquelle le réseau est partitionné en un ensemble de groupes (clusters). Plusieurs protocoles de routage hiérarchiques ont été proposés dans la littérature, LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est le plus connu d'eux. Dans ce chapitre nous présentons tout d'abord le protocole (LEACH) et quelques de ces variants parmi ceux le notre, on termine par une étude comparative entre ces protocoles.

### 2.2 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Le protocole LEACH est l'un des protocoles de routage hiérarchique les plus connus pour les réseaux de capteurs sans fils. Il est considéré comme la référence et l'initiateur de plusieurs protocoles de routage hiérarchique proposé il y a plus de 18 ans. Ses objectifs principaux se résument dans [14] :

- ✦ Augmenter la durée de vie du réseau.
- ✦ Diminuer la dissipation d'énergie des nœuds de capteurs.
- ✦ Réduisez le nombre de messages de communication.

## 2.2.1 Fonctionnement de LEACH

Le protocole LEACH utilise le principe de clustering en divisant le réseau en deux niveaux [14] : les cluster-heads et les nœuds membres. Le protocole se déroule en round (ou tour). Chaque round se compose de deux phases : construction et communication.

### 2.2.1.1 Phase de construction (setup phase)

Divisée en trois sous phases : La sélection de CH, formation de cluster et assignation de TDMA (Time-division multiple access).

- ✓ **La sélection de CH** : Dans un premier temps, lors de la création des clusters, chaque nœud décide s'il devient ou non chef de cluster pour le cycle en cours. Cette décision est basée sur le pourcentage suggéré de cluster Head pour le réseau (déterminé a priori) et le nombre de fois que le nœud a été CH jusqu'à présent. Chaque nœud choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1, si le nombre est inférieur à un seuil  $T(S_i)$  le nœud devient CH pour le tour courant. Le seuil est défini comme suit :

$$\begin{cases} T(S_i) = \frac{p}{1 - p * r \bmod(\frac{1}{p})} & \text{Si } S_i \in G \\ T(S_i) = 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.1)$$

Où :

$p$  : pourcentage souhaité de nœud à devenir un CH.

$r$  : numéro de tour courant.

$G$  : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus CH pendant les  $1/p$  tours précédents.

Les auteurs de protocole ont démontré que :

- Chaque nœud sera CH à un moment donné au cours de  $\frac{1}{p}$  tour.
- Au cours du  $tour_0$  ( $r=0$ ), tout les nœuds peuvent participer dans le processus d'élection de CH.
- Les nœuds CH au cours du  $tour_0$  ne peuvent pas être CH pour les  $\frac{1}{p}$  prochains tours (Figure 2.1 ).

- ✓ **Formation de cluster** :

À la fin de processus de sélection, chaque CH émet un message de notification afin de permettre aux nœuds non CH de décider l'appartenance ou non à son cluster [12]. La décision se fait sur la base de la force du signal reçu (RSSI) [14], le CH avec le signal le plus fort sera choisi.

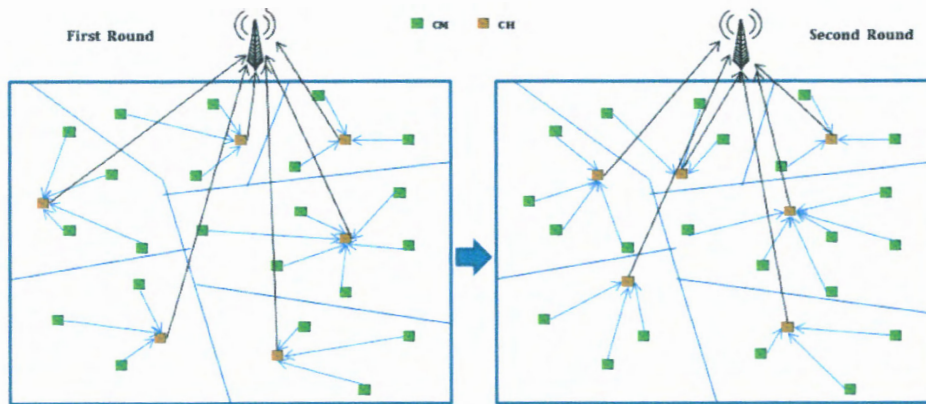


FIGURE 2.1: Protocole LEACH avec deux tours différents

### ✓ Assignation de TDMA :

Chaque CH crée un planning de schedule TDMA et le transmet vers tous ses membres. Ce schedule définit le temps (slot) réservé pour chaque membre de cluster pour transmettre ses données au CH.

#### 2.2.1.2 Phase de communication (steady phase) :

En utilisant le schedule TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Ces informations sont ensuite agrégées, pour être transmises à la station de base. Cette communication, entre un cluster-head et la station de base, se fait d'une manière directe, i.e. : le cluster-head adapte son émetteur radio afin d'atteindre directement la station de base(Figure 2.2 ) [16].

#### 2.2.2 Interférences entre clusters

Afin de réduire les interférences entre les signaux émis par les membres de différents clusters, chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA et informe ses membres de son cluster afin de l'utiliser dans leurs transmissions. chaque CH reconnaît les signaux de ses membres à travers ces codes.

#### 2.2.3 Avantages de LEACH

Bien que LEACH économise la consommation énergie, LEACH a plusieurs avantages parmi les nous citons [13, 16] :

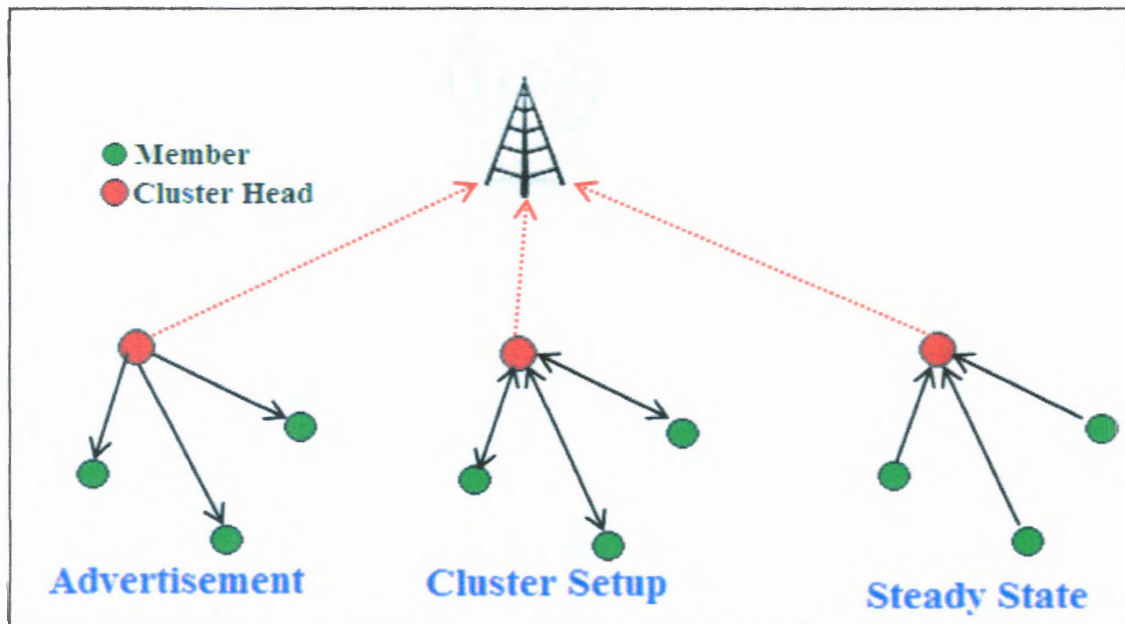


FIGURE 2.2: Les différentes phases de LEACH

- Le concept de clustering utilisé par le protocole LEACH applique moins de communication entre les nœuds de capteurs et le BS, ce qui augmente la durée de vie du réseau.
- La propriété de distributivité du rôle de CH entre les membres d'un cluster.
- Il ne requiert pas d'information sur la localisation des nœuds capteurs dans le réseau afin de former les groupes.

### 2.2.4 Inconvénients de LEACH

Parmi les inconvénients présentés par LEACH on cite [17] :

- Les CHs ne sont pas uniformément distribués dans le cluster, ce qui résulte l'isolement de certains nœuds s'ils n'ont pas de CH dans leurs voisinages.
- on ne peut pas avoir des CHs durant un round si la probabilité générée est supérieure à  $T(n)$ .
- les CHs éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station de base.

## 2.3 Les Successeurs de LEACH

Le succès extraordinaire du protocole Leach en termes de conservation de l'énergie a fait en lui une référence significative dans presque tous les protocoles de routage



hiérarchiques. Dans cette section on va présenter cinq variantes de ce dernier : LEACH-C, TB-LEACH, EM-LEACH, ALEACH et le notre LEEBSDN.

### 2.3.1 LEACH-C (LEACH Centralized)

Les créateurs de LEACH ont mis en place une version centralisée baptisé LEACH-C [16], conçu pour améliorer les performances de protocole LEACH.

Dans le protocole LEACH-C, chaque noeud est doté d'un GPS pour identifier son emplacement. A chaque tour, chaque noeud envoie ses informations : position et niveau d'énergie résiduelle, à la station de base. Cette dernière se charge ensuite de calculer l'énergie moyenne des nœuds  $E_{AVG}$  et seule les nœuds dont leurs énergies sont supérieure à  $E_{AVG}$  peuvent participer dans le processus d'élection de CH.

L'énergie moyenne  $E_{AVG}$  [16] de réseau peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$E_{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad (2.2)$$

Où :

$E_i$  : présente l'énergie résiduelle de  $i^{eme}$  nœud.

$N$  : présente le nombre des nœuds.

Après avoir désigné les CHs, la station de base établie  $K$  clusters en utilisant l'algorithme d'optimisation de recuit simulé (métaheuristique).  $K$  peut être calculé par l'équation suivante [16] :

$$K = \sqrt{\frac{N \mathcal{E}_{fs}}{2\pi \mathcal{E}_{mp} d_{toBS}^2}} \quad (2.3)$$

Où :

$d_{toBS}^2$  : présente la distance moyenne entre les CH et le BS.

$\mathcal{E}_{fs}$  : présente l'énergie requise pour l'amplification des signaux transmis dans un espace libre.

$\mathcal{E}_{mp}$  : présente l'énergie requise pour l'amplification des signaux transmis en multi-trajets.

$\mathcal{M} * \mathcal{M}$  : espace de la zone de détection.

Une fois les clusters déterminés, la station de base envoie à chaque nœud son statut et le cluster auquel il appartient.

La phase de communication de LEACH-C est la même que celle de LEACH.

### 2.3.2 TB-LEACH (Time-based Cluster selection LEACH)

Dans [18] *Junping et al.*, ont présenté un nouveau protocole basé sur Leach, baptisé TB-Leach. Dans ce protocole l'algorithme de sélection de CH de protocole Leach a été modifiée afin d'améliorer la construction des clusters.

Dans TB-LEACH, la sélection de CH ne dépend pas sur le choix d'un nombre aléatoire mais sur un intervalle de temps aléatoire (timer). Les nœuds ayant les plus courts intervalles de temps gagneront la compétition et deviendront des CH. Afin d'obtenir un nombre constant de CH, un compteur est mis en place. Lorsque le compteur atteint une valeur spécifiée, les nœuds ne continuent plus la compétition pour devenir CH.

La formation des clusters, l'assignation de TDMA et la phase de communication sont similaire au protocole LEACH.

### 2.3.3 EM-LEACH (Enhanced multi-hop LEACH)

Dans [19], *Sara et al.* ont proposé un nouveau algorithme de clustering basé sur le protocole LEACH, appelé EM-LEACH. Dans ce dernier, le seuil  $T(n)$  et la taille de round dépendent de facteurs de l'énergie résiduelle et de l'énergie initiale de nœud. Le seuil  $T(n)$  est défini par :

$$\begin{cases} T(n) = \frac{1}{2} * [\beta * \frac{p}{1 - p * (r * \text{mod} \frac{1}{p})} + (1 - \beta) * \frac{E_{residual}}{E_{initial}}] & \text{Si } n \in G \\ T(n) = 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.4)$$

Où :

$E_{residual}$  : présente l'énergie résiduelle de nœud.

$E_{initial}$  : présente l'énergie initial de nœud.

$\beta = \frac{E_{residual}}{E_{initial}}$  présente le poids attribué au pourcentage  $p$ .

La taille de round est définie par :

$$RoundLength = InitialRoundLength * (1 - \frac{1 - Energyrate}{\alpha + Energyrate}) \quad (2.5)$$

Où :

$\alpha$  : une constante (d'après les auteurs de ce protocole, les meilleurs résultats sont obtenus avec avec  $\alpha = 1.5$ ).

Dans EM-Leach, les clusters sont organisés en plusieurs niveaux dont les CHs de niveau

$n$  peuvent être des membres des CHs de niveau  $n-1$  (la station de base présente le niveau 0).

La formation des clusters et l'assignation de TDMA sont similaire au protocole LEACH. L'envoi des données depuis un CH vers la station de base se fait en sauts multiples.

### 2.3.4 ALEACH (Advanced LEACH)

Dans [20] Solaiman et al ont redéfini le seuil  $T(n)$  afin de laisser les nœuds ayant un niveau énergétique plus élevé de devenir des CH pour augmenter la durée de vie de réseau. Dans ce protocole  $T(n)$  est définie par :

$$T(n) = G_p + CS_p \quad (2.6)$$

Où :

$CS_p$  : présente la probabilité de l'état actuel de nœud, définit par :

$$CS_p = \frac{E_{cur}}{E_{Max}} * p \quad (2.7)$$

$G_p$  : présente la probabilité général de nœud, définit par :

$$G_p = \frac{p}{1 - p * rmod(\frac{1}{p})} \quad (2.8)$$

Avec :

$E_{cur}$  : L'énergie courant du nœud.

$E_{Max}$  : L'énergie maximum du réseau.

La formation des clusters, l'assignation de TDMA et la phase de communication sont similaire au protocole LEACH.

## 2.4 LEEBSDN (LEACH Energy Effecient Base Station Divided Network)

Après avoir étudié plusieurs variants de protocole LEACH, on a constaté qu'on peut améliorer ce dernier (LEACH), En utilisant deux concepts des protocoles TB-LEACH et LEACH-C, tout en présentant un fonctionnement complètement différent.

Le protocole LEEBSDN (LEACH Energy Effecient Base Station Divided Network) est un

protocole de routage hiérarchique qui s'appuie sur le principe de clustering dynamique, il permet d'organiser le réseau en deux niveaux afin d'assurer un routage mono-saut entre les nœuds et la station de base. Dans cet objectif, nous avons défini un nouveau mécanisme de routage qui permet de réduire la consommation de l'énergie des nœuds capteurs dans le réseau.

### 2.4.1 Principe et fonctionnement

L'énergie reste le défi critique dans les réseaux de capteurs, car ils sont dotés de batteries non rechargeables ni remplaçables. Ainsi, l'un des objectifs principaux des protocoles dédiés aux réseaux de capteurs est de minimiser la consommation d'énergie tout en assurant le bon fonctionnement de ces réseaux. LEEBSDN est proposé comme un nouveau protocole de clustering suivant cet objectif. LEEBSDN est similaire à LEACH en fonction de cycle de fonctionnement où il se déroule en round (tour) et chaque round se compose de deux phase :construction et communication (Figure 2.3).

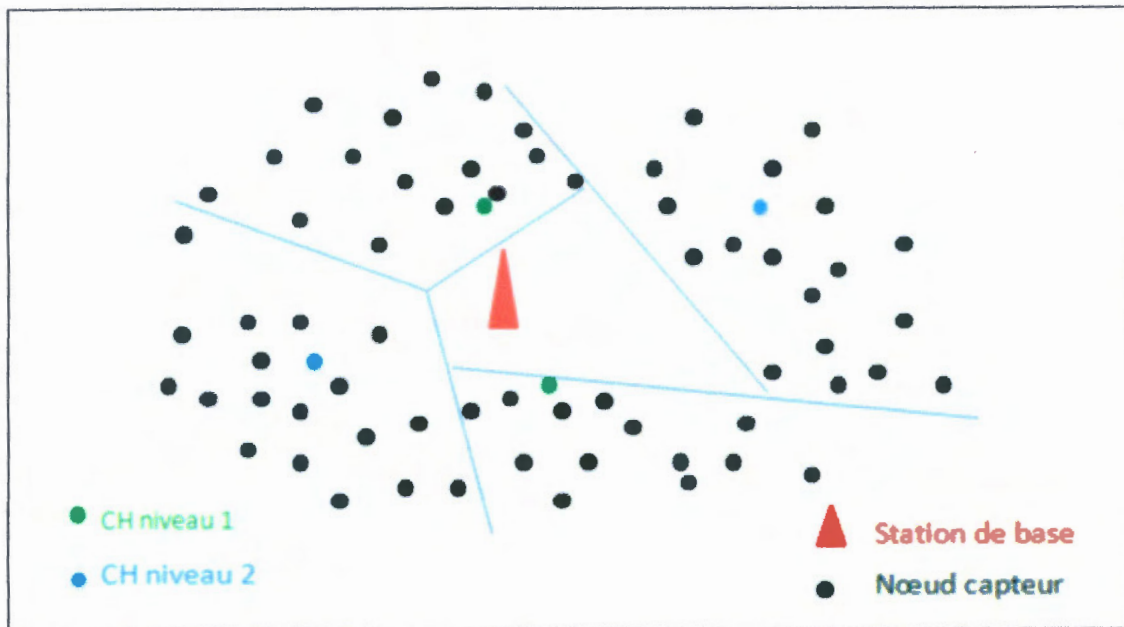


FIGURE 2.3: La structure de réseau avec le protocole LEEBSDN

#### 2.4.1.1 Phase de construction

Divisé en trois sous phases :La selection de CH, formation de cluster et assignation de TDMA.



- ✦ **La sélection de CH** : la phase de sélection de CH est mise en place par la station de base. cette dernière récupère le statut (position et le nombre des voisins) de chaque capteur dans le réseau. La station de base élu un nombre fixe de CH à chaque round, le nombre optimale des CHs dans notre proposition est s'inspiré depuis le protocole TB-LEACH [18] où les auteurs de ce protocole définit le nombre optimal  $K_{opt}$  des clusters dans un réseau à cent nœuds est égal à quatre. La station de base divise le réseau en deux niveaux chacun doté de deux CHs. Les clusters head du premier niveau sont élus en se basant sur la distance entre les nœuds et la station de base, Les nœuds les plus proches à la station de base seront sélectionnés comme des CH. Les CHs de niveau deux sont sélectionnés en se basant sur le nombre des voisins de nœud, Les nœuds avec un nombre de voisin maximum deviennent des CHs.
- ✦ **La formation de cluster** : Après avoir désigné les CHs, chaque CH diffuse un message de notification au autres nœuds contenant sa position. Un nœud  $SN$  rejoindre un CH si la distance entre le nœud  $SN$  et son CH plus la distance entre le CH et la station de base soit minimale.

$$\forall j \neq i : d_{CH_i to BS} + d_{SN to CH_i} < d_{CH_j to BS} + d_{SN to CH_j} \quad (2.9)$$

Où :

$d_{CH_i to BS}$  : est la distance depuis le  $i^{eme}$  CH vers la station de base.

$d_{SN to CH_i}$  : est la distance depuis un nœud vers le  $i^{eme}$  CH.

Pourquoi on a pris en compte dans le choix des CHs le facteur de la distance et les nombres de voisins de chaque nœud ?

- **La distance** : Nous savons que les nœuds consomment moins d'énergie lorsqu'ils sont très proches à la station de base lors de transmission de leurs données collectées, ce qui préserve l'énergie de réseau si le rôle de CH est tourné entre les nœuds les plus proche à la station de base.
- **Le nombre des voisins** : Les nœuds avec un nombre élevé de voisins ont une probabilité élevé de détient le rôle de CH, ce qui rendre le réseau fortement connecté et élimine la possibilité d'avoir des nœuds isolés.
- ✦ **Assignment de TDMA** : Chaque CH crée un planning de schedule TDMA et le transmet vers tous ses membres. Ce schedule définit le temps (slot) réservé pour chaque membre de cluster pour transmettre ses données au CH.

### 2.4.1.2 Phase de transmission

La phase de transmission est similaire à celle de LEACH, chaque nœud transmet les données collectées à son CH pendant son propre slot. Ces données sont ensuite agrégées, pour être transmises à la station de base. cette communication, entre un CH et la station de base, se fait d'une manière directe.

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

La table (Tab. 2.1) montre la comparaison entre les protocoles étudiés précédemment suivant les points cités ci-dessous :

- ◆ **Année** : montre l'année à laquelle remonte la définition de chaque protocole.
- ◆ **Connectivité** : Le nombre de saut (hop) que fait un paquet pour arriver chez la station de base.
- ◆ **Algorithme** : Le type d'algorithme utilisé centralisé ou distribué.
- ◆ **Énergie** : L'efficacité de protocole en terme d'efficacité énergétique.
- ◆ **Passage à l'échelle** : La performance de protocole pour s'adapter dans les large réseaux.

Tous les protocoles cités ont une mobilité fixe et ils fonctionnent dans des réseaux homogènes.

<b>Protocole</b>	<b>Année</b>	<b>Connectivité</b>	<b>Algorithme</b>	<b>Énergie</b>	<b>Scalability</b>
LEACH	2000	mono-saut	distribué	modéré	limité
TB-LEACH	2008	mono-saut	distribué	modéré	modéré
LEACH-C	2002	mono-saut	centralisé	élevé	limité
EM-LEACH	2018	multi-saut	distribué	élevé	élevé
ALEACH	2008	mono-saut	distribué	élevé	modéré
LEEBSDN	2019	mono-saut	hybride	élevé	modéré

TABLE 2.1: Comparaison entre les différentes variantes de LEACH

D'après le tableau ci-dessus (TABLE. 2.1), LEACH et LEACH-C ont la mauvaise scalabilité par rapport au autres protocoles car la communication entre les CHs et la station de base est directe, dans les réseaux à grande échelle la radio doit utiliser des puissances d'émission très élevé qui consomme beaucoup d'énergie et plusieurs nœuds CHs meurent rapidement. Par contre, dans une communication multi-saut, (le cas de EM-LEACH), l'efficacité énergétique de réseau est élevé ainsi que la scalabilité, la radio consomme moins d'énergie et les CHs restent fonctionnelle durant une durée considérable.

Enfin, 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 les critères.

## 2.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le protocole LEACH et quelques de ses variants ainsi que notre proposition. Le protocole LEACH est considéré comme une base pour tous les protocoles de routage hiérarchiques proposés dans la littérature. Il minimise la consommation globale d'énergie en distribuant la charge à tous les nœuds. LEACH est un protocole efficace pour les réseaux de capteurs sans fil de petite envergure, mais il a rencontré plusieurs limites pour les réseaux de grande taille. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour améliorer ce protocole et pallier ces défis.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation de protocoles LEACH, TB-LEACH , ALEACH ainsi notre protocole LEEBSDN.

## Chapitre 3

# Implémentation

---

### 3.1 Introduction

Fin de faire une étude comparative entre le protocole LEACH et ses variants, nous **A** avons implémenté les protocoles LEACH, TB-LEACH, ALEACH et notre protocole LEEBSDN sous le simulateur OMNET++/INET.

Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu, présenter la plate-forme logicielle que nous avons utilisé pour l'implémentation et la simulation ainsi que quelques autres simulateurs, ensuite, nous allons présenter les résultats de simulation en comparant le protocole LEACH avec ses variants ALEACH, TB-LEACH et LEEBSDN.

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

Il existe plusieurs simulateur conçu pour les réseaux de capteurs, on cite quelques uns :

#### ✦ OPNET (Optimum NETWORK Performance)

OPNET [21] est un simulateur à événements discrets. Il permet de simuler le comportement et les performances de tous types de réseau et surtout les réseaux sans fil. La différence principale entre Opnet Network Simulator et d'autres simulateurs réside dans sa puissance et sa polyvalence. Il fournit des modèles prédéfinis de protocoles et de périphériques. OPNET vous permet de créer et de simuler différentes topologies de réseau.



#### ✦ NS-2 (Network Simulator 2 )

NS est un outil logiciel de simulation de réseaux informatiques. Il est essentiellement élaboré avec les idées de la conception par objets, de la réutilisation du code et de modularité. Il est aujourd'hui un standard de référence en ce domaine, plusieurs laboratoires de recherche recommandent son utilisation pour tester les nouveaux protocoles. Le simulateur NS actuel est particulièrement bien adapté aux réseaux à commutation de paquets et à la réalisation de simulation de grande taille (le test du passage à l'échelle). Il contient les fonctionnalités nécessaires à l'étude des algorithmes de routage unicast ou multicast, des protocoles de transport, de session, des services intégrés, des protocoles d'application,...etc. Le langage de base de NS est le C++. L'outil NAM (Network Animator), associé au simulateur NS, permet de visualiser des animations de la simulation (transfert des paquets d'un nœud à un autre, taille des paquets,...etc).

#### ✦ J-SIM

J-SIM [22] est un environnement de simulation à événements discrets, open source, basé sur une architecture de composant autonome et développé en Java. Il utilise TCL pour la mise en place des scénarios de simulation.

#### ✦ OMNET++ (Objective Modular Network Testbed)

OMNET++ [23] est un projet open source dont son développement a commencé en 1992 par Andras Vargas à l'université de Budapest. Il est utilisé pour la simulation des événements discrets. OMNET++ représente une bibliothèque écrite en C++ permettant de faire des simulations non seulement des réseaux filaires et sans fil mais aussi la modélisation des protocoles de communication et des systèmes répartis, les architectures hardware,...etc. En général, il peut être utilisé pour n'importe quel système d'événements discrets avec des entités communiquant par l'envoi de messages. Parmi ses fonctionnalités le soutien pour les réseaux de capteurs, les réseaux ad-hoc sans fil, des protocoles internet, la modélisation des performances.

### 3.3 Environnement et paramètres de simulation

Dans notre simulation on a utilisé le simulateur OMNET++ comme environnement de simulation avec l'intégration de la plateforme *INET*.

Nous avons choisi OMNET++ comme simulateur car il est en premier temps libre et ouvert. Son architecture modulaire permettant l'intégration de nouveau modèle, scénarios et protocoles, etc. De plus Omnet++ est performant et très outils dans le cas des simulation avec des réseaux denses comme les réseaux de capteurs sans fil.

### 3.3.1 Les paramètres de simulation

Les paramètres de simulation sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeur
La surface	100 * 100 m
Taille du paquet de données	100 Byte
Nombre de nœuds capteurs	50, 100, 200, 300
Énergie initiale	0.1J, 0.2J
Emplacement de la station de base	(0,10)
déploiement des nœuds	aléatoire
pourcentage d'agrégation	5%
P	0.05

TABLE 3.1: Paramètres de simulation

#### ✦ Caractéristiques de médium utilisés :

Pour la simulation on a utilisé comme radio intégré dans les nœuds capteurs, la radio *ATmega256RFR2* avec les paramètres suivants :

Paramètres	Valeur
Énergie consommé en mode sleep	0.1 mW
Énergie consommé de transition	1 mW
Énergie consommé en mode actif (Idle)	2 mW
Énergie consommé en mode transmission (Tx)	100 mW
Énergie consommé en mode réception (Rx)	10 mW

TABLE 3.2: Caractéristiques des noeuds capteurs

#### ✦ Configuration matériel :

Dans notre expérimentation on a utilisé un ordinateur portable avec les caractéristiques suivants :

Matériel	TOSHIBA
OS	Ubuntu 18.10
RAM	4 G
Processeur	intel(R) core(TM) i5-5200u CPU @ 2.20 GHZ
OStype	64 bit
Disk	72.4 GB

TABLE 3.3: Équipements de manipulation

### 3.3.2 Métriques de performances

Pour étudier l'efficacité énergétique des protocoles étudiés, nous allons comparer les résultats de simulation de protocole LEACH avec ses deux variants ALEACH et TB-LEACH, et les résultats de simulation de protocole LEACH avec notre protocole LEEBSDN. Notre comparaison va se focaliser essentiellement sur la durée de vie de réseau, Le nombre des nœuds vivants et le pourcentage des paquets délivrés à la station de base.

- ✦ **Durée de vie** : Chaque capteur doit gérer efficacement son énergie afin de garder le réseau en état opérationnel. Nous avons défini la durée de vie du réseau comme étant le temps écoulé entre l'instant où le réseau commence son fonctionnement et l'instant où le premier nœud tombe en panne. Elle mesurer en second (s).
- ✦ **Le nombre des nœuds vivants** : Nous avons calculer le nombres des nœuds vivants dans le réseaux en fonction de temps pour chaque protocole.
- ✦ **Le pourcentage des paquets délivrés à la station de base** : Nous avons calculé le pourcentage des paquets délivrés à la station de base, pour le protocole LEACH et LEEBSDN seulement, en utilisant la formule suivante :

$$(Nombre\ des\ paquets\ reçu\ par\ la\ SB / Nombre\ total\ des\ paquets\ de\ donnée) * 100$$

## 3.4 Évaluation des performances et comparaison

Dans cette section, nous présentons les résultats d'évaluation des performances des protocoles cités ci-dessus.

### 3.4.1 Durée de vie de réseau

La figure suivante (3.1) montre la durée de vie de réseau en fonction de nombre des noeuds avec les protocoles LEACH, ALEACH, TB-LEACH et LEEBSDN.

**Discussion** : On constate que TB-LEACH préserve une durée de vie plus compétitif par rapport au autres protocoles cela est dû au nombre constant des CHs et au répartition équilibrée des clusters, sa dissipation d'énergie est donc équilibrée et quasi minimale par rapport à LEACH.

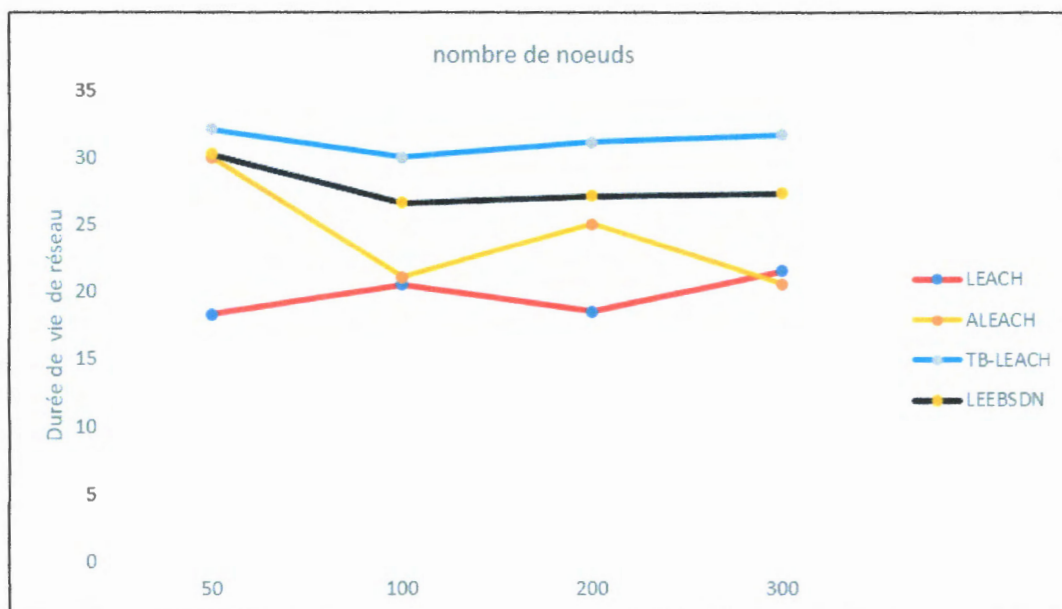


FIGURE 3.1: La durée de vie en fonction de nombres des noeuds

Le protocole ALEACH montre une durée de vie plus longue que celle de LEACH parce qu'il utilise le niveau d'énergie restant pour choisir les CHs, alors que LEACH ne se concentre pas du tout sur le niveau d'énergie des noeuds.

Nous constatons que notre protocole LEEBSDN apporte une durée de vie supérieure au protocole LEACH et celle de ALEACH. Ceci est dû principalement au mécanisme de sélection des CH appliqué par notre protocole, ainsi que le mécanisme de formation des clusters adapté dans le réseau, où la distance entre les noeuds, les CHs et la station de base est prise en considération. L'utilisation du facteur de la distance lors de formation des clusters et de sélection de CH conduit à une augmentation remarquable dans la durée du vie du réseau par rapport à celle offerte par le protocole LEACH.

### 3.4.2 Nombre de noeuds vivants

La Figure (3.2) montre le nombre des noeuds vivants dans le réseau en fonction de temps avec les protocoles LEACH, ALEACH, TB-LEACH et LEEBSDN.

**Discussion :** Nous constatons que pour 100 noeuds le réseau disparaît entre la quatre-vingtième seconde et la centième seconde avec les quatre protocoles.



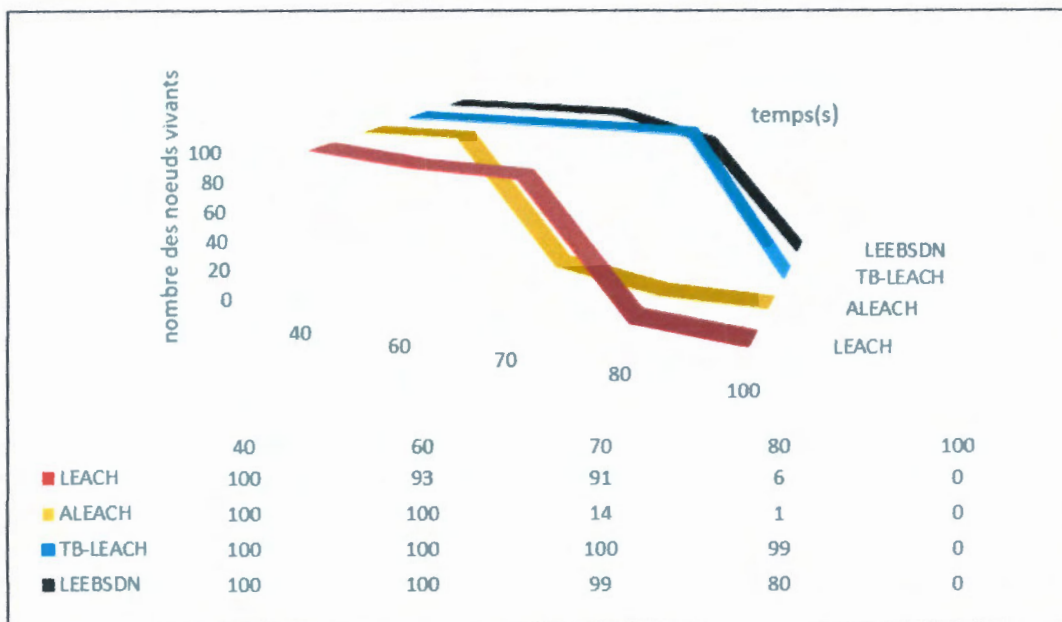


FIGURE 3.2: Nombre de nœuds vivants en fonction de temps

### 3.4.3 Pourcentage des paquets délivrés à la station de base

La figure 3.3 montre le nombre des paquets délivrés à la station de base en fonction de temps avec le protocole LEACH et LEEBSN.

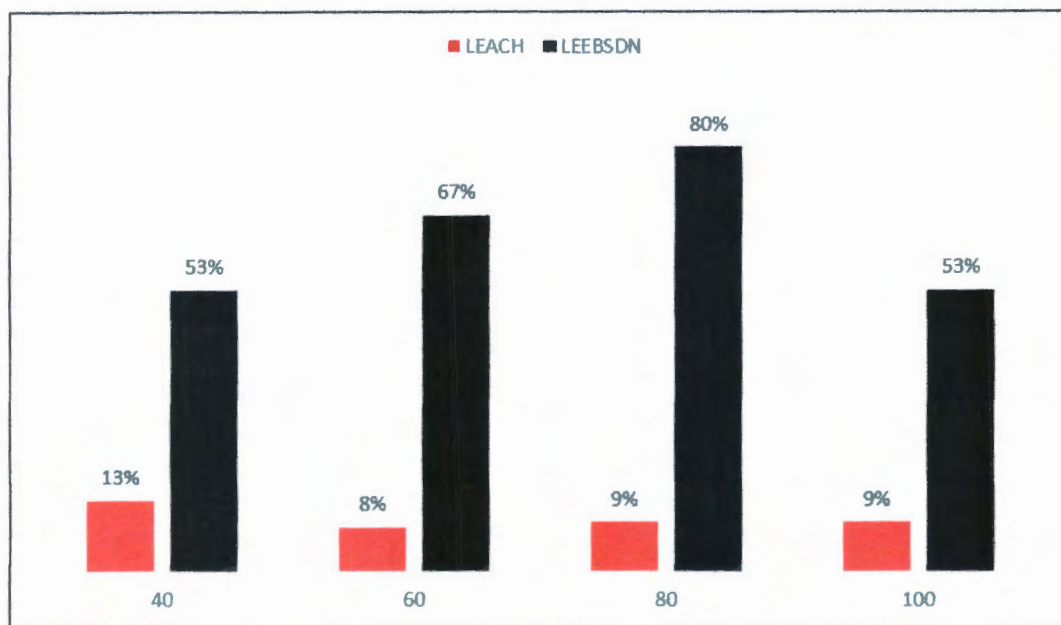


FIGURE 3.3: Pourcentage des paquets délivrés à la station de base

**Discussion :** Nous constatons que le nombre des paquets délivrés à la station de base avec le protocole LEEBSN est plus élevé que celui de protocole LEACH. Cela est dû à la durée de vie du réseau de capteurs avec LEEBSN qui est plus longue par rapport à celle de LEACH.

### Fichier de configuration

La figure (Figure 3.4) et (Figure 3.5) représentent le fichier de configuration (fichier.ini) utilisé dans notre expérimentation pour montré les différents paramètres de simulation des quatre protocoles.

```
[General]
network = WSN
**.vector-recording = true
sim-time-limit = 100s
**.s*.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.mobility.constraintAreaMinZ = 0m
**.mobility.constraintAreaMaxZ = 0m
**.mobility.constraintAreaMinX = 0m
**.mobility.constraintAreaMinY = 0m
**.mobility.constraintAreaMaxX = 100m
**.mobility.constraintAreaMaxY = 100m
**.s*.wlan[*].typename = "Ieee802154NarrowbandInterface"
**.s*.wlan[*].mac.typename = "Ieee802154NarrowbandMac"
**.s*.wlan[*].radio.typename = "Ieee802154NarrowbandScalarRadio"
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.typename = "StateBasedEpEnergyConsumer"
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.offPowerConsumption = 0mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.sleepPowerConsumption = 0.1mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.switchingPowerConsumption = 1mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.receiverIdlePowerConsumption = 2mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.receiverBusyPowerConsumption = 5mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.receiverReceivingPowerConsumption = 10mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.transmitterIdlePowerConsumption = 2mW
*.s*.wlan[*].radio.energyConsumer.transmitterTransmittingPowerConsumption = 100mW
*.s*.wlan[*].radio.displayCommunicationRange = true
**.visualizer.radioVisualizer.displayRadioMode = true
**.visualizer.radioVisualizer.displayReceptionState = true
**.visualizer.radioVisualizer.radioFilter = "Ieee80211ScalarRadioMedium"
*.visualizer.mediumVisualizer.displaySignals = true
*.visualizer.energyStorageVisualizer.displayEnergyStorages = true
*.visualizer.mediumVisualizer.displayCommunicationRanges = true
*.visualizer.dataLinkVisualizer.lineColor = "blue"
*.visualizer.dataLinkVisualizer.lineStyle = "dashed"
*.visualizer.dataLinkVisualizer.lineWidth = 6
*.visualizer.dataLinkVisualizer.displayLinks = true
*.visualizer.dataLinkVisualizer.fadeOutMode = "simulationTime"
*.visualizer.dataLinkVisualizer.fadeOutTime = 0.1s
```

FIGURE 3.4: Fichier de configuration .ini



```

**.Number_Of_Sensors=${50,100,200,300}
**.AgregationPourcentage = 0.05
**.p = 0.05
**.numApps = 1
**.Nbr_CH = 0
**.Nbr_Round = 65
**.TimeToSend = 0.2
**.s*.app[*].typename = "App"
**.sinkAddress="0A-00-00-00-00-01"
**.sink.wlan[0].mac.address = "0A-00-00-00-00-01"
**.Buffer_Size=5
**.sink.energyStorage.typename = "IdealEpEnergyStorage"
**.se*.energyStorage.typename = "SimpleEpEnergyStorage"
**.se*.energyStorage.nominalCapacity = ${0.1J,3.1J}
**.se*.energyStorage.initialCapacity = ${0.09,3.09J}
**.se*.energyManagement.typename = "SimpleEpEnergyManagement"
**.se*.energyManagement.nodeShutdownCapacity = 0.01J
*.radioMedium.pathLoss.typename = "FreeSpacePathLoss"
**.hasStatus =true
**.sink.mobility.initFromDisplayString = false
**.se*.mobility.initFromDisplayString = false
**.sink.mobility.initialX =0m
**.sink.mobility.initialY = 10m
**.case = ${1,2}
[Config LEACH]
description = "LEACH"
**.s*.MyProtocol.typename = "LEACH"
[Config TB-LEACH]
description = "First Variant: Time Based LEACH"
**.s*.MyProtocol.typename = "TB_LEACH"
[Config ALEACH]
description = "Second Variant: Advanced LEACH"
**.s*.MyProtocol.typename = "ALEACH"
[Config LEEBSNC]
description = "Our Proposition"
**.s*.MyProtocol.typename = "LEEBSNC"

```

FIGURE 3.5: Reste de Fichier de configuration

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude comparative menée pour l'évaluation des performances des protocoles LEACH, TB-LEACH, ALEACH et LEEBSNC. Nous avons concentré surtout sur la mesure de la durée de vie du réseau, le nombre des nœuds vivants en fonction de temps et le pourcentage des données délivrés à la station de base. Nous avons constaté que le protocole LEACH reste toujours moins performant, et cela dû à la négligence du facteur de l'énergie lors de sélection des CHs et de formation des clusters.



# Conclusion Générale

LES réseaux de capteurs sans fil envahissent progressivement tous les domaines. Tous d'abord, utilisés dans la surveillance de l'environnement et des animaux. Ensuite, ils ont apporté leur support dans les activités de secourisme. Maintenant, ils font leur apparition dans des applications encore plus utilisées pour améliorer notre confort. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisque elle influe directement sur la durée de vie des micros capteurs, voire du réseau en entier, étant donnée que le routage de donnée est un facteur déterminant dans la gestion économique d'énergie, plusieurs recherche ont été effectuées afin de proposer des stratégies de routages dont certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux tandis que d'autres sont spécialisés pour les réseaux de capteurs.

Nous avons essayé à travers ce mémoire de faire le tour sur les réseaux de capteurs sans fil avec l'implémentation et la simulation de quatre protocoles qu'on a étudié : LEACH, TB-LEACH, ALEACH et LEEBSDN. Nous avons commencé par présenter une vue générale sur les réseaux de capteurs sans fils, avec leurs principales caractéristiques, problématiques et défis. Par la suite, nous avons focalisé notre étude sur la fonctionnalité clé de ses réseaux qui est le routage des données. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au protocole de routage hiérarchique LEACH et ses variants.

Guidés par l'objectif de réduire la consommation énergétique des noeuds capteurs pour augmenter la durée de vie du réseau, nous avons conçu un nouveau protocole de routage hiérarchique nommé LEEBSDN (LEACH Energy Effecient Base Station Divided Network). Il adopte une organisation des noeuds du réseau en deux niveaux : Selon la distance qui sépare les noeuds et la station de base, et le nombre de voisin de chaque noeud. Cette configuration en niveaux offre une souplesse dans la communication des données captées vers la station de base et permet une gestion plus efficace des ressources énergétiques lors du routage de données dans le réseau.



L'évaluation de performance des quatre protocoles LEACH, TB-LEACH, ALEACH et LEEBSDN a été effectuée avec la plateforme INET sous le simulateur OMNET++. Nous avons concentré notre étude sur trois critères de performances : la durée de vie du réseau, le nombre des nœuds vivants et le pourcentage des paquets délivrés à la station de base. Nous avons montré que la solution proposée rivalise parfaitement avec des solutions existantes en termes d'énergie consommée, et maximise la durée de vie du réseau.

Comme perspective de notre travail, nous voudrions appliquer notre approche dans un environnement réel et étudier la possibilité de la mobilité de la station de base. Ainsi que l'adaptation d'un mécanisme de maintenance des CHs pour mieux augmenter le nombres des nœuds vivants dans le temps.

# Bibliographie

- [1] Feng Zhao, Leonidas J Guibas, and Leonidas Guibas. *Wireless sensor networks : an information processing approach*. Morgan Kaufmann, 2004.
- [2] Ayoub Med Seghir and Cherabi Salim. Proposition d'un algorithme de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire, Université A. Mira de Béjaia*, 2015.
- [3] Mohamed Lehsaini. *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique*. PhD thesis, Besançon, 2009.
- [4] Guillaume Gaillard. *Opérer les réseaux de l'Internet des Objets à l'aide de contrats de qualité de service (Service Level Agreements)*. PhD thesis, 12 2016.
- [5] Anna Forster. *Introduction to wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] Malick GAYE. *Etat de l'art sur les WSN (Wireless Sensor Network)*. PhD thesis, 2014.
- [7] Sasha Slijepcevic and Miodrag Potkonjak. Power efficient organization of wireless sensor networks. In *ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No. 01CH37240)*, volume 2, pages 472–476. IEEE, 2001.
- [8] MOAD Sofiane and Nizar Bouabdallah. La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Rapport de recherche, Institut De formation supérieure en informatique et communication IFSIC, Rennes*, 2008.
- [9] Belkheyr Sahraoui. *La Géo-localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil*. PhD thesis, 2011.
- [10] Mohamed Tabaa. *Conception d'un système de transmission ultra-large bande par impulsions orthogonales*. PhD thesis, 11 2014.
- [11] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*, pages 10–pp. IEEE, 2000.

- [12] Diery Ngom. *Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau*. PhD thesis, Mulhouse, 2016.
- [13] Ravneet Kaur, Deepika Sharma, and Navdeep Kaur. Comparative analysis of leach and its descendant protocols in wireless sensor network. *International Journal of P2P Network Trends and Technology*, 3(1) :51–55, 2013.
- [14] Vishal Kumar Arora, Vishal Sharma, and Monika Sachdeva. A survey on leach and other's routing protocols in wireless sensor network. *Optik*, 127(16) :6590–6600, 2016.
- [15] Quazi Mamun. A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks. *Sensors*, 12(11) :14887–14913, 2012.
- [16] Sunil Kumar Singh, Prabhat Kumar, and Jyoti Prakash Singh. A survey on successors of leach protocol. *IEEE Access*, 5 :4298–4328, 2017.
- [17] Parminder Kaur and Mamta Katiyar. The energy-efficient hierarchical routing protocols for wsn : a review. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2(11), 2012.
- [18] Hu Junping, Jin Yuhui, and Dou Liang. A time-based cluster-head selection algorithm for leach. In *2008 IEEE Symposium on Computers and Communications*, pages 1172–1176. IEEE, 2008.
- [19] Sara Al-Sodairi and R Ouni. Reliable and energy-efficient multi-hop leach-based clustering protocol for wireless sensor networks. *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, 20, 09 2018.
- [20] Md Solaiman Ali, Tanay Dey, and Rahul Biswas. Aleach : Advanced leach routing protocol for wireless microsensor networks. In *2008 International Conference on Electrical and Computer Engineering*, pages 909–914. IEEE, 2008.
- [21] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, Stephen B Wicker, et al. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. In *ICDCS workshops*, volume 578, 2002.
- [22] John A Miller, Rajesh S Nair, Zhiwei Zhang, and Hongwei Zhao. Jsim : A java-based simulation and animation environment. In *Proceedings of 1997 SCS Simulation Multiconference*, pages 31–42. IEEE, 1997.
- [23] Ahmed Ayadi. Extensions du simulateur omnet++ pour la validation de mécanismes de transmission multimédia dans les réseaux ieee 802.11. *Mémoire, Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique*, 2007.