

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et de la Technologie



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER EN COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUE

**Domaine :** Science et technologie

**Filière :** Electrotechnique

**Spécialité :** Commande des machines électrique

## Thème

*Simulation d'un protocole  
écoénergétique dans le réseau de  
capteurs sans fil (RCSEF)*

**Préparé par:**

- ✓ ZENGUILA Chahira
- ✓ SBAI Zineb

**Encadré par:**

Mr. KADDI Mohammed

Année Universitaire : 2019/2020

## Résumé :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une révolution technologique des instruments de mesures, issue de la convergence des systèmes électroniques miniaturisés et des systèmes de communication sans fil. Il s'agit d'ensembles d'unités électroniques miniaturisées capables de mesurer certains phénomènes physiques dans l'environnement où ils sont déployés. En raison des contraintes de miniaturisation, et aussi de coût de fabrication, les nœuds de capteurs sont généralement dotés de ressources très limitées en termes d'énergie, de capacité du calcul, d'espace du stockage de données et de débit de transmission. Ces limitations motivent une grande partie des problématiques de recherche dans le domaine des RCSFs, en particulier, la contrainte de l'énergie qui est un problème fondamental. L'objectif de ce travail est d'implémenter et simule le protocole écoénergétique PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended) pour minimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du RCSF. La performance de ce protocole est testée à l'aide du langage de programmation MATLAB.

**Mots clés:** Capteur, Réseau de capteurs sans fils, Consommation d'énergie, Durée de vie, PEGASIS-E, MATLAB.

## Abstract :

Wireless Sensor Networks (WSNs) represent a technological revolution in measuring instruments, resulting from the convergence of miniaturized electronic systems and wireless communication systems. They are sets of miniaturized electronic units capable of measuring certain physical phenomena in the environment in which they are deployed. Due to the constraints of miniaturization, as well as the cost of manufacture, sensor nodes generally have very limited resources in terms of energy, compute capacity, data storage space and transmission rate. These limitations motivate a large part of the research problems in the field of SCNS, in particular, the energy constraint which is a fundamental problem. The objective of this work is to implement and simulate the energy efficient PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended) protocol to minimize power consumption and extend the life of the RCSF. The performance of this protocol is tested using the MATLAB programming language.

**Keywords :** Sensor, Wireless Sensor Networks, Energy consumption, Lifetime, PEGASIS-E, MATLAB.

## ملخص:

تمثل شبكات الاستشعار اللاسلكية (RCSF) ثورة تكنولوجية في أدوات القياس، ناتجة عن تقارب الانظمة الالكترونية المصغرة وأنظمة الاتصالات اللاسلكية. انها مجموعات من الوحدات الالكترونية المصغرة القادرة على قياس ظواهر فيزيائية معينة في بيئة التي يتم نشرها فيها. نظراً لقيود التصغير، فضلاً عن تكلفة التصنيع، تمتلك عُقد الاستشعار عموماً موارد محدودة للغاية من حيث الطاقة وسعة الحساب ومساحة تخزين البيانات ومعدل النقل. تحفز هذه القيود جزءاً كبيراً من مشكلات البحث في مجال SCNC، ولا سيما قيود الطاقة التي تمثل مشكلة أساسية. الهدف من هذا العمل هو تنفيذ ومحاكاة بروتوكول PEGASIS-E (التجميع الموفر للطاقة في نظام معلومات الاستشعار الممتد) لتقليل استهلاك الطاقة وإطالة عمر RCSF. يتم اختبار أداء هذا البروتوكول باستخدام لغة البرمجة MATLAB.

**الكلمات المفتاحية:** الاستشعار، شبكة الاستشعار اللاسلكية، استهلاك الطاقة، مدى الحياة، PEGASIS-E، MATLAB.

# Remerciement

*Nous remercions en premier notre grand Dieu pour nous a donné le courage et la volonté durant les moments difficiles et qui nous a donné la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail.*

*Nous remercions l'encadreur Mr. KADDI Mohammed Pour sa bonne volonté d'accepter de nous encadrer, pour tout le temps qu'il nous a octroyé et pour tous les conseils qu'il nous a prodigué.*

*Nous remercions les membres du jury et tous les enseignants et employée dans le département de sciences de la technologie.*

*Nous remercions tous les membres de famille ZENGUILA et SBAI pour leurs soutiens et encouragements.*

*Nous remercions toute les amies et collègues de la section commande électrique.*

*Merci à tous ceux qui ont aidé, de près ou de loin, pour que ce travail.*

*Merci à vous tous.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents Kaddour et mebaraka que dieu leur pardonne.*

*A mon oncle Abd Alrahman et ma tante Zahrona pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la durée d'étude.*

*A mon grand frère Mohammed et sa femme pour leur soutien moral.*

*A tous mes frères et mes sœurs pour leur appui tout au long de mon parcours universitaire.*

*A toute ma famille Z'ENGUILA et BOUGRINE « tantes, oncles, cousins et cousines ».*

*Aux juniors de la maison « Rafel Djarwad, Oussama, Cherif, Inas, Rjtadj, Ranim, Mariam, Rayan, Wissam, Abdo et Melissa ».*

*A mon binôme zineb.*

*A toute mes amies et collègues de l'université d'Adrar.*

*A tous ce qui m'a aidé de près ou de loin pour terminer ce projet, Sans oublier ceux qui m'ont aidé, surtout pendant les moments les plus difficiles de ma vie.*

**Chahira**

# Dédicace

*C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail :  
A mes très chers parents, qui m'ont soutenu, encouragé pour  
que je puisse mener à bien mes études, et qui attendu ce jour  
avec impatience.*

*A tous mes frères, mes sœurs et toute ma famille, en témoignage de  
mon profond respect.*

*A mes amis et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé durant le  
parcours de mes études.*

*A mon binôme : CHAHIRA.*

*A mes enseignants et mes amies de l'étude.*

*A tous ceux que j'aime dans le monde.*

**Zineb**

## Table des matières

Résumé.....	I
Remerciement.....	II
Dédicace .....	III
Table des matières.....	V
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Liste des acronymes.....	XII
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur le réseau de capteur sans fil.....</b>	<b>2</b>
I.1 Introduction.....	3
I.2 Capteur.....	3
I.2.1 Définition d'un capteur.....	3
I.2.2 Les type de capteurs.....	3
I.2.2.1 Capteur actifs.....	3
I.2.2.2 Capteur passifs.....	4
I.2.3 Architecture d'un capteur.....	4
I.2.3.1 Architecture matériel.....	4
I.2.3.2 Architecture logicielle.....	6
I.2.3.3 Architecture protocolaire.....	6
I.3 Capteur sans fil (CSF).....	7
I.3.1 Définition d'un CSF.....	7
I.4 Réseau de capteur sans fil (RCSF).....	8
I.4.1 Définition d'un RCSF.....	8
I.4.2 Architecture d'un RCSF.....	8
I.4.3 Caractéristique de RCSF.....	8
I.4.3.1 Energie limitée.....	8
I.4.3.2 Ressources limités.....	9
I.4.3.3 Densité et déploiement des nœuds.....	9
I.4.3.4 Modèle de communication.....	9

I.4.3.5 Tolérance de fautes.....	9
I.4.3.6 Absence d'adressage fixe.....	9
I.4.3.7 Auto-organisation.....	9
I.4.3.8 Sécurité limité.....	10
I.4.4 Facteurs et contraintes de RCSF.....	10
I.4.4.1 La tolérance aux pannes.....	10
I.4.4.2 Le passage à l'échelle.....	10
I.4.4.3 La topologie de réseau.....	10
I.4.4.4 Les contraintes matérielles.....	10
I.4.4.5 Les médias de transmission.....	10
I.4.4.6 La consommation d'énergie.....	11
I.4.5 Domaines d'application de RCSF.....	11
I.4.5.1 Applications militaires.....	11
I.4.5.2 Applications médicales.....	12
I.4.5.3 Applications domestiques.....	12
I.4.5.4 Applications environnementales.....	13
I.4.5.5 Applications commerciales.....	13
I.5 Conclusion.....	13
<b>Chapitre II : Economie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.....</b>	<b>15</b>
II.1 Introduction.....	16
II.2 Notion de durée de vie d'un réseau.....	16
II.3 Consommation d'énergie d'un nœud CSF.....	16
II.3.1 Energie de capture.....	17
II.3.2 Energie de traitement.....	17
II.3.3 Energie de communication.....	17
II.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie.....	18
II.4.1 Etat du module radio.....	18
II.4.2 Accès au medium de transmission.....	18
II.4.2.1 La retransmission.....	18
II.4.2.2 L'écoute active.....	18
II.4.2.3 La surécoute.....	19
II.4.2.4 La surcharge.....	19
II.4.2.5 La surémission.....	19

II.4.2.6 La taille des paquets.....	19
II.4.3 Modèle de propagation radio.....	19
II.4.4 Routage des données.....	20
II.5 Les sources de gaspillage d'énergie.....	20
II.5.1 Les collisions.....	20
II.5.2 L'écoute à vide.....	20
II.5.3 L'écoute abusive.....	20
II.5.4 L'overmitting.....	21
II.5.5 L'over Head des paquets de contrôle .....	21
II.6 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie.....	21
II.7 Conclusion.....	22
<b>Chapitre III : Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil.....</b>	<b>23</b>
III.1 Introduction.....	24
III.2 Routage.....	24
III.3 Contraintes de routage dans les RCSFs.....	24
III.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs.....	25
III.4.1 Selon la structure du réseau.....	26
III.4.1.1 Routage à plat.....	26
III.4.1.2 Routage hiérarchique.....	26
III.4.1.3 Routage basé sur la localisation.....	27
III.4.2 Selon les types de protocoles.....	28
III.4.2.1 Routage basé sur la QDS.....	28
III.4.2.2 Routage basé sur la négociation.....	29
III.4.2.3 Routage multi chemins.....	29
III.4.2.4 Routage basé sur les interrogations.....	30
III.5 Exemples des protocoles de routage proposés pour les RCSFs.....	30
III.5.1 Protocoles de routage hiérarchique.....	30
III.5.1.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	30
III.5.1.2 PEGASIS (Power Efficient GATHERing in Sensor Information systems).....	31
III.5.1.3 TEEN et APTEEN.....	32
III.5.2 Protocoles de routage non hiérarchique.....	32
III.5.2.1 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector).....	32



III.5.2.2 AODV (Ad-Hoc On Demand Distance Vector ).....	33
III.5.2.3 SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation).....	34
III.6 PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended) .....	35
III.7 Conclusion.....	37
<b>Chapitre IV : Implémentation du protocole PEGASIS-E.....</b>	<b>38</b>
IV.1 Introduction.....	39
IV.2 Le choix de langage de programmation.....	39
IV.3 Le modèle du système.....	40
IV.3.1 Le modèle de réseau.....	40
IV.3.2 Le modèle de dissipation de l'énergie.....	40
IV.4 Organigramme pour l'implémentation du protocole PEGASIS-E.....	41
IV.5 Implémentation de protocole PEGASIS-E.....	43
IV.5.1 Description de l'interface "Simulateur RCSF" .....	43
IV.5.2 Résultats de simulation.....	46
IV.5.2.1 Les paramètre de simulation.....	46
IV.5.2.2 Analyse des résultats.....	47
IV.6 Conclusion.....	50
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>52</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Exemple de capteur.....	3
<b>Figure I.2</b> : Architecture matériel d'un capteur.....	5
<b>Figure I.3</b> : La pile protocolaire.....	7
<b>Figure I.4</b> : Exemple d'un CSF.....	7
<b>Figure I.5</b> : Architecture d'un RCSF.....	8
<b>Figure I.6</b> : RCSF dans des applications militaires.....	11
<b>Figure I.7</b> : RCSF dans des applications médicales.....	12
<b>Figure I.8</b> : RCSF dans des applications domestiques.....	12
<b>Figure I.9</b> : RCSF dans des applications environnementales.....	13
<b>Figure I.10</b> : RCSF dans des applications commerciales.....	13
<b>Figure II.1</b> : Consommation d'énergie en capture, traitement et transmission.....	17
<b>Figure II.2</b> : La surécoute dans une transmission.....	19
<b>Figure II.3</b> : Les techniques de conservation d'énergie.....	21
<b>Figure III.1</b> : Classification des protocoles de routage pour les RCSFs selon la structure du réseau et le type de protocole.....	25
<b>Figure III.2</b> : Protocoles de routage à plat.....	26
<b>Figure III.3</b> : Protocoles de routage hiérarchique.....	27
<b>Figure III.4</b> : Protocoles de routage basé sur la localisation.....	28
<b>Figure III.5</b> : Le protocole LEACH.....	31
<b>Figure III.6</b> : Le protocole PEGASIS.....	31
<b>Figure III.7</b> : Protocole TEEN et APTEEN.....	32
<b>Figure III.8</b> : Les deux requêtes RREQ et RREP.....	33
<b>Figure III.9</b> : Le protocole SPIN.....	34
<b>Figure IV.1</b> : Le modèle de dissipation de l'énergie.....	41
<b>Figure IV.2</b> : Organigramme du protocole PEGASIS-E.....	42
<b>Figure IV.3</b> : L'interface de l'environnement de simulation.....	43
<b>Figure IV.4</b> : Paramètres de simulation.....	44
<b>Figure IV.5</b> : Zone de simulation.....	44
<b>Figure IV.6</b> : Légende.....	45
<b>Figure IV.7</b> : Résultats de simulation.....	46
<b>Figure IV.8</b> : Nombre de données transmises à la BS Vs nombre de rounds.....	47

<b>Figure IV.9 :</b> Energie résiduelle Vs nombre de rounds.....	48
<b>Figure IV.10 :</b> Nombre de nœuds vivants Vs nombre de rounds.....	49

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1</b> : Comparaison de quelque protocole de rouage dans le RCSF.....	35
<b>Tableau IV.1</b> : Caractéristique matérielle.....	39
<b>Tableau IV.2</b> : Paramètres de simulation.....	46

## Liste des acronymes

<b>ADC</b>	Analoge to Digital Converter.
<b>AODV</b>	Ad hoc On demand Distance Vector.
<b>APTEEN</b>	Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol.
<b>SB</b>	Station de Base.
<b>C4ISR</b>	Commande Control Communication Computing Intelligence Surveillance Reconnaissance and Targeting.
<b>CADR</b>	Constrained Anisotropic Diffusion Routing.
<b>CAN</b>	Convertisseur Analogique Numérique.
<b>CH</b>	Cluster Head.
<b>CPU</b>	Central Processing Unit.
<b>CSIP</b>	Collaborative Signal and Information Processing.
<b>CSF</b>	Capteur Sans Fil.
<b>DD</b>	Diffusion Directe.
<b>DSDV</b>	Destination Sequenced Distance Vector.
<b>DVS</b>	Dynamique Voltage Scaling.
<b>EAR</b>	Energy Aware Routing.
<b>GAF</b>	Geographic Adaptive Fidelity.
<b>GEAR</b>	Geographic and Energy Aware Routing.
<b>GPS</b>	Global Position System.
<b>GUI</b>	Graphique Interface Utilisateur.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>IP</b>	Internet Protocol.
<b>LEACH</b>	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.
<b>MAC</b>	Medium Access Control.
<b>MATLAB</b>	matrix laboratory.
<b>MECN</b>	Minimum Energy Communication Network.
<b>OS</b>	Open Source.
<b>PEGASIS</b>	Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems.
<b>PEGASIS-E</b>	Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended.
<b>QDS</b>	Qualité de Service.
<b>QOS</b>	Quality of service.
<b>RAM</b>	Random Access Memory.

**RCSFs** Réseaux de Capteurs Sans Fil.  
**RF** Radio Frequency.

## **Introduction générale**

Dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est une contrainte très cruciale puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile, voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent principalement sur les moyens de réduire au minimum l'énergie consommée dans la communication de données de sorte à maximiser la durée de vie du réseau. Ces travaux ne sont pas suffisamment efficaces et robustes, ce qui nous a motivés à travailler sur la problématique de l'énergie afin de proposer une solution qui minimise la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau en conséquence.

Le but de ce mémoire est d'implémenter et simule le protocole écoénergétique PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended) pour réduire la consommation et de la dissipation d'énergie afin de maximiser la durée de vie des nœuds capteur et le réseau entier. La simulation et l'évaluation de la performance de protocole PEGASIS-E est réaliser à l'aide du langage de programmation MATLAB.

Dans ce mémoire est structuré autour de quatre chapitres. Au cours du premier chapitre, nous présentons un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fil. Quant au second chapitre, nous présenterons économie d'énergie dans les RCSFs en définissant la durée de vie des réseaux de capteurs et nous allons résumer les différentes approches de minimisation de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs. Dans le troisième chapitre, nous présenterons les principaux protocoles de routage utilisés dans ce réseaux, ainsi que leurs classifications et une comparaison entre chacun d'eux. Dans le dernier chapitre, nous avons présenté l'implémentation de protocole PEGASIS-E dans l'environnement MATLAB, et faire une étude comparative entre ce protocole et le protocole LEACH.

# Chapitre I

## *Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil*

---

### Sommaire

---

I.1 Introduction.

I.2 Capteur.

I.3 Capteur sans fil.

I.4 Réseau de capteur sans fil.

I.5 Conclusion.



## I.1 Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs ou WSNs : Wireless Sensor Networks en anglais) sont aujourd'hui une des technologies très importantes qui est utilisé pour les communications.

Nous présentons dans ce chapitre une description générale des RCSFs ainsi que leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs facteurs et contraintes, et les domaines d'application.

## I.2 Capteur :

### I.2.1 Définition d'un capteur :

Les capteurs sont des composants essentiels de la chaîne d'acquisition dans un système fonctionnel. Ce sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure, ils prélèvent une information sur le comportement de la partie opérative qui sera exploitée par la partie commandes c'est-à-dire qu'ils transforment les grandeurs que l'on veut mesurer appelées mesurandes. Cette mesure peut être physique (lumière, pression, chaleur...) ou chimique (gaz, liquide, acide...) d'un processus ou d'une installation en signaux électriques [1].



Figure I.1 : Exemple de capteur.

### I.2.2 Les types de capteurs [2] :

On peut classer les capteurs en deux catégories :

#### I.2.2.1 Capteurs actifs :

Fonctionnant en **générateur**, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

On peut citer parmi ces effets :

- **Effet thermoélectrique** : un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$ , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique  $e(T_1, T_2)$ .
- **Effet piézo-électrique** : l'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.
- **Effet d'induction électromagnétique** : la variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).
- **Effet photo-électrique** : la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.
- **Effet Hall** : un champ magnétique  $B$  et un courant électrique  $I$  créent dans le matériau une différence de potentiel  $U_H$ .
- **Effet photovoltaïque** : des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

### I.2.2.2 Capteurs passifs :

Il s'agit généralement **d'impédance** dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.

Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

### I.2.3 Architecture d'un capteur :

#### I.2.3.1 Architecture matériel :

Un nœud capteur se compose généralement de quatre composants de base : unité de capteur, unité de traitement, unité de communication et unité d'alimentation (de puissance), qui est représentée sur la fig. I.2.

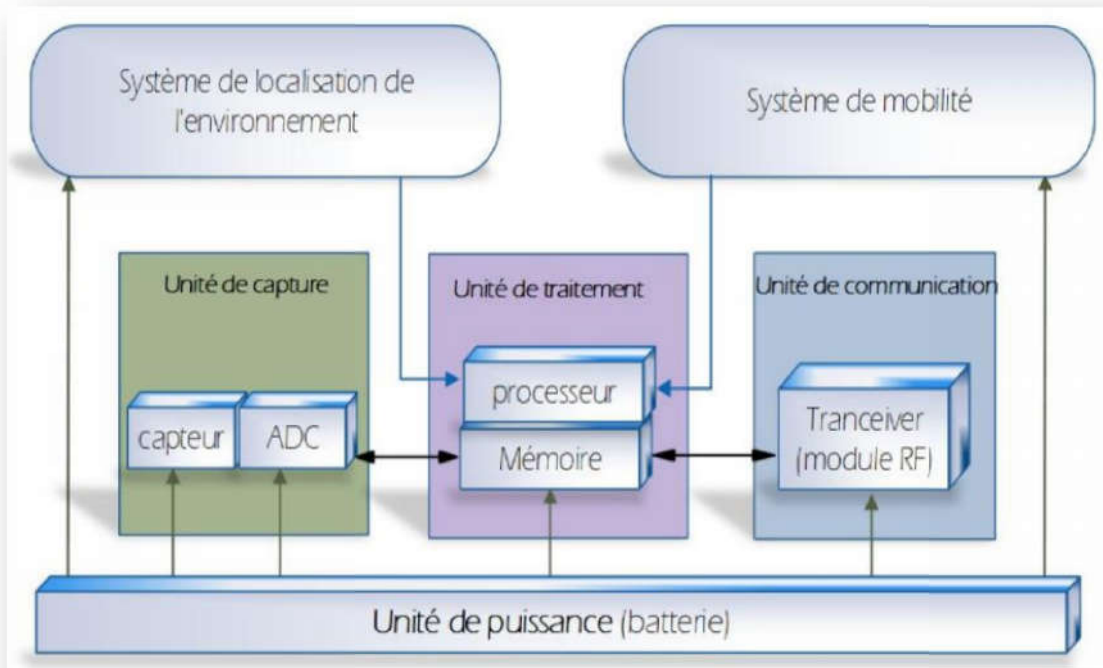


Figure I.2 : Architecture matériel d'un capteur.

- **L'unité de capteur:** se compose généralement d'un ou plusieurs capteurs et d'un convertisseur Analogique/Numérique (CAN), ou (ADC pour Analog to digital Converter). Les capteurs observent le phénomène physique et génèrent signaux analogiques basés sur le phénomène observé. Les ADC convertissent l'analogique des signaux en signaux numériques, qui sont ensuite envoyés à l'unité de traitement [3].
- **L'unité de traitement:** est généralement constituée d'un microcontrôleur ou d'un microprocesseur avec mémoire (par exemple), qui fournit un contrôle intelligent au nœud du capteur [3].
- **L'unité de communication:** Consiste en une radio à courte portée pour effectuer la transmission et la réception de données sur canal radio [3].
- **L'unité de puissance :** se compose d'une batterie pour alimenter tous les autres composants du système [3].

De plus, un nœud de capteur peut également être équipé de quelques autres unités, selon les applications spécifiques. Par exemple, un système de localisation géographique (GPS : Global Position System) peut être nécessaire dans certaines applications qui nécessitent des informations de localisation pour le fonctionnement du réseau. Un système de mobilité peut être nécessaire pour déplacer les nœuds de capteur dans certaines tâches de détection. Toutes ces unités doivent être intégrées dans un petit module à faible consommation d'énergie et à faible coût de production [3].

### I.2.3.2 Architecture logicielle :

Un capteur est généralement géré par un mini système d'exploitation, pour supporter les différentes opérations des nœuds. Ces systèmes d'exploitation utilisent une architecture basée sur les composantes du capteur. Cela permet une implémentation et une innovation rapide et un code source de taille réduite. Nous citons comme exemple de systèmes d'exploitation : Mote, Mote2, TinyOS, Zig Bee et SOS.

TinyOS est l'un des systèmes d'exploitation destiné aux RCSFs. Il est intégré, modulaire, destiné aux réseaux de capteurs miniatures. Cette plate-forme logicielle ouverte et une série d'outils développés par l'Université de Berkeley est enrichie par une multitude d'utilisateurs. En effet, TinyOS est le plus répandu des OS (Open Source) pour les RCSFs. Il est utilisé dans les plus grands projets de recherches sur le sujet.

Cet OS est capable d'intégrer très rapidement les innovations en relation avec l'avancement des applications et des réseaux eux même tout en minimisant la taille du code source en raison des problèmes inhérents de mémoire dans les réseaux de capteurs. La librairie TinyOS comprend les protocoles réseaux, les services de distribution, les pilotes de périphériques (drivers) pour capteurs et les outils d'acquisition de données. TinyOS est a une grande partie écrite en C mais on peut très facilement créer des applications personnalisées en langages C, NesC et Java [4].

### I.2.3.3 Architecture protocolaire :

La pile protocoles utilisée par le puits (sink) ainsi que par tous les nœuds capteurs est donnée dans la fig. I.3. Cette pile de protocoles combine routage et gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseau. Elle communique de manière efficace (en termes d'énergie) à travers le support sans fil et favorise les efforts de coopération entre les nœuds capteurs. La pile protocoles comprend une couche application, une couche transporte, une couche réseau, une couche liaison de donnée, une couche physique, un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches. Selon les tâches de détection, différents types de logiciels d'application peuvent être construits et utilisés dans la **couche application**. La **couche transport** contribue au maintien du flux de données si l'application du réseau de capteurs l'exige. La **couche réseau** s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport. Comme l'environnement est sujet au bruit et que les nœuds capteurs peuvent être mobiles, le **protocole MAC** doit tenir compte de la consommation d'énergie et doit être en mesure de réduire les collisions entre les nœuds voisins lors d'une diffusion par exemple. La **couche physique** répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception.

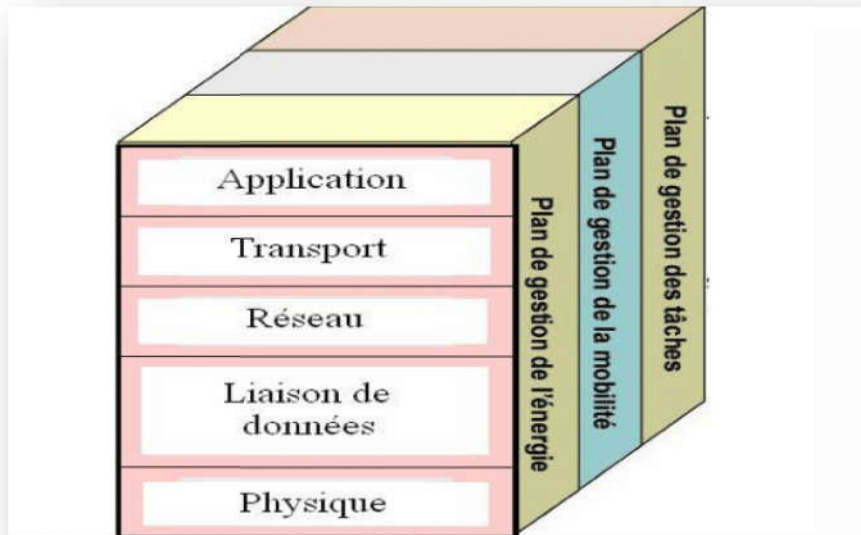


Figure I.3 : La pile protocolaire.

En outre, les plans de gestion d'énergie, de mobilité et des tâches entre surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements et la répartition des tâches entre les nœuds capteurs. Ces plans aident les nœuds capteurs à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie [5].

### I.3 Capteur sans fil (CSF) :

#### I.3.1 Définition d'un CSF :

Un CSF est un dispositif électrique de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression,...) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base [6].



Figure I.4 : Exemple d'un CSF.

## I.4 Réseau de capteur sans fil (RCSF) :

### I.4.1 Définition d'un RCSF :

Un RCSF est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de régir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil [7].

### I.4.2 Architecture d'un RCSF :

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds capteurs, déployés de manière prédéfinie ou aléatoirement, dans une zone d'intérêt appelé zone de captage, afin de surveiller un événement ou un phénomène physique et de collecter leurs données d'une manière autonome. Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelée nœud puit ou station de base. La station de base transmet ensuite ces données par internet ou par satellite à un centre de contrôle distant. Par ailleurs, l'utilisateur peut envoyer des requêtes aux autres nœuds du réseau pour connaître l'état d'une telle région. En outre, dans certaines architectures, le modèle peut impliquer des nœuds puissants en termes d'énergie appelé "passerelles" pour relayer les données [8].

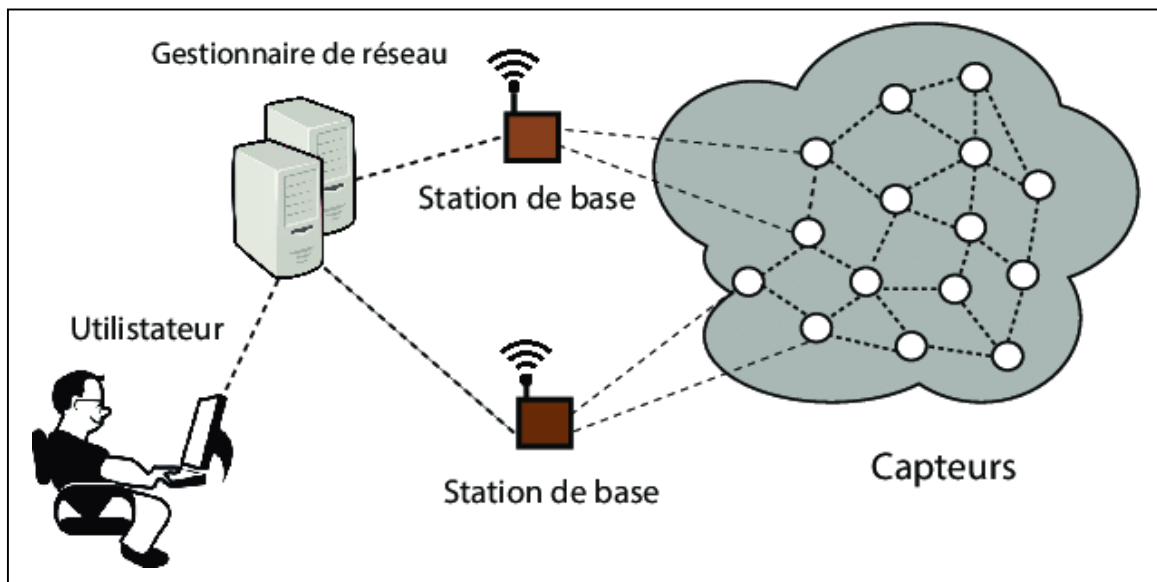


Figure I.5 : Architecture d'un RCSF.

### I.4.3 Caractéristique de RCSF [9] :

#### I.4.3.1 Énergie limitée :

Les RCSFs 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.

#### **I.4.3.2 Ressources limités :**

A cause de miniaturisation des composants électronique. 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, ces limitations imposent des portées de transmission réduites contraignant les informations à être relayées.

#### **I.4.3.3 Densité et déploiement des nœuds :**

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture total de la zone à surveiller, 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.

#### **I.4.3.4 Modèle de communication :**

Les nœuds dans les RCSFs communiquent selon un paradigme plusieurs à un (many to one). En effet, 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.

#### **I.4.3.5 Tolérance de fautes :**

Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruptions en cas de défaillance d'un ou plusieurs de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, ou par dommage physique ou interférence de l'environnement.

#### **I.4.3.6 Absence d'adressage fixe :**

Les nœuds dans les réseaux sans fil classique sont identifiés par des adresses IP. Cependant, cette notion n'existe pas dans les RCSFs. En effet, les requêtes des utilisateurs ne sont pas généralement destinées à un seul nœud, mais plutôt, à un ensemble de nœuds identifiés.

#### **I.4.3.7 Auto-organisation :**

L'auto organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Vu les différentes raisons résultant une topologie instable du réseau de capteur, ce dernier devra être capable de s'auto organiser pour continuer ses applications.

**I.4.3.8 Sécurité limitée :**

A l'instar des réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par l'autonomie limitée et la miniaturisation des capteurs qui par conséquent ont une puissance de calcul limitée, ce qui empêche l'utilisation de mécanisme cryptographique résistant comme la cryptographie à clé publique, ajouté à cela le déploiement de ces capteurs dans des environnements hostiles les expose un danger qui tend vers la falsification de l'information.

En effet, les nœuds eux-mêmes sont des points de vulnérabilité du réseau car ils peuvent être modifiés, remplacés ou supprimés.

**I.4.4 Facteurs et contraintes de RCSF :**

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [6] :

**I.4.4.1 La tolérance aux pannes :**

La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau en présence de pannes. La fiabilité des RCSFs est affectée par des défauts qui se produisent à cause de diverses raisons telles que le mauvais fonctionnement du matériel ou à cause d'un manque d'énergie.

**I.4.4.2 Le passage à l'échelle :**

La plupart des protocoles conçus pour les RCSFs ont visé au début des réseaux de petite taille. Cependant, ces protocoles peuvent voir leurs performances se dégrader quand le nombre de nœuds augmente. Ce facteur est connu sous le nom "passage à l'échelle".

**I.4.4.3 La topologie de réseau :**

Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...) et redéploiement de nœuds additionnels.

**I.4.4.4 Les contraintes matérielles :**

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,...), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.

**I.4.4.5 Les médias de transmission :**

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit



être standardisé. On utilise le plus souvent l'infrarouge, le Bluetooth [10] et les communications radio Zig Bee [11].

#### **I.4.4.6 La consommation d'énergie :**

La durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie sa batterie puisque le remplacement de la batterie est impossible et surtout si le capteur est déployé dans des zones hostiles. Dans un réseau de capteurs, chaque nœud collecte des données et les transmet à la station de base. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et l'établissement de nouveaux mécanismes de routage. Ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation [12].

#### **I.4.5 Domaines d'application de RCSF :**

L'intérêt des réseaux de capteurs est réellement vu à travers l'éventail très large des domaines d'application. Les applications des réseaux de capteurs peuvent être classées en cinq familles [13].

##### **I.4.5.1 Applications militaires :**

Les RCSFs peuvent être considérés comme une partie intégrale des systèmes C4ISRT (Command, Control, Communications, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance et Targeting). Nous pouvons citer parmi les applications militaires :

- ✓ La surveillance du champ de bataille.
- ✓ Examen des forces et terrains de l'ennemi.
- ✓ Estimation des dégâts de la bataille.
- ✓ Détection et reconnaissance des attaques nucléaires, biologiques et chimiques [14].



Figure I.6 : RCSF dans des applications militaires.

### I.4.5.2 Applications médicales :

La surveillance des fonctions vitales de l'être humain serait possible grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalées ou implantés sous la peau. Actuellement, des micro-caméras qui peuvent être avalées existent. Elles sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain. L'utilisation des réseaux de capteur dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies [15].



Figure I.7 : RCSF dans des applications médicales.

### I.4.5.3 Applications domestiques :

Comme la technologie progresse, les nœuds capteurs intelligentes et actionneurs peuvent être embarqués dans des dispositifs, comme l'aspirateur, micro-onde, réfrigérateurs. Ces capteurs dans les dispositifs domestiques peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe par internet ou satellite. Ils permettent à l'utilisateur final de gérer les dispositifs domestiques localement ou à distance plus facilement [14].

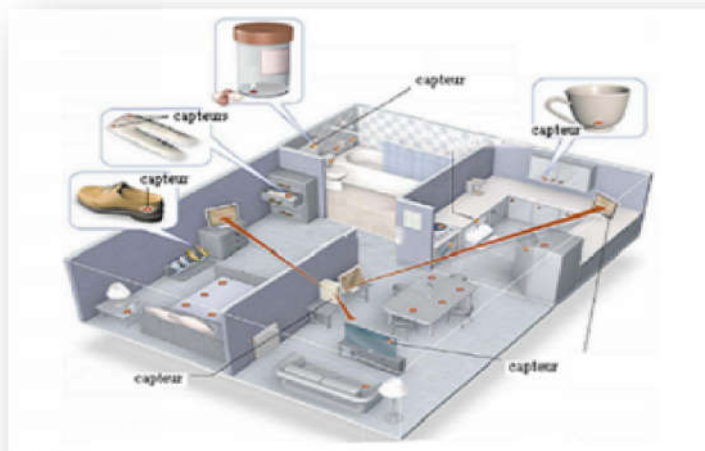


Figure I.8 : RCSF dans des applications domestiques.

#### I.4.5.4 Applications environnementales :

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés dans les champs agricoles, sur les sites industriels, dans les centrales nucléaires, dans les pétroliers, dans les forêts ou pour la surveillance de l'environnement marin.



Figure I.9 : RCSF dans des applications environnementales.

#### I.4.5.5 Applications commerciales :

Pour les entreprises, les réseaux de capteur permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [14].



Figure I.10 : RCSF dans des applications commerciales.

### I.5 Conclusion :

Après avoir étudié les RCSFs son concept, son architecture, ses caractéristiques et ses domaines d'applications. Nous avons également remarqué que de nombreux facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseau.

En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau. C'est ce que nous examinerons dans le chapitre suivants.

# Chapitre II

## *Economie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*

---

### Sommaire

---

II.1 Introduction.

II.2 Notion de durée de vie d'un réseau.

II.3 Consommation d'énergie d'un nœud CSF.

II.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie.

II.5 Les sources de gaspillage d'énergie.

II.6 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie.

II.7 Conclusion.

## II.1 Introduction :

La limitation d'énergie dans les capteurs sans fil, et les environnements hostiles dans lesquels ils pourraient être déployés, sont des facteurs qui rendent ce type de réseaux très vulnérables. Ainsi, la perte de connexions sans fils peut être due à une extinction d'un capteur suite à un épuisement de sa batterie.

Dans ce chapitre nous étudierons la durée de vie des réseaux de capteurs, l'ensemble des facteurs et contraintes qui influent non seulement sur les techniques d'optimisation de la durée de vie, les différentes sources d'énergies et nous présenterons aussi une technique de conservations d'énergie.

## II.2 Notion de durée de vie d'un réseau [5] :

La durée de vie prévue est critique dans tout déploiement de réseau de capteurs. Le but des scénarios applicatifs classiques consiste à déployer des nœuds dans un domaine sans surveillance pendant des mois ou des années.

La vie d'un réseau de capteurs correspond à période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau. La vie du système est donc liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. La vie nodale correspond à la vie d'un des nœuds du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose. La quantité prédominante d'énergie est consommée par un nœud capteur durant la détection, la communication puis le traitement des données.

Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où le premier nœud meurt. Elle peut également être définie par le temps jusqu'au moment où une proportion de nœuds meurt. Si la proportion de nœuds morts dépasse un certain seuil, cela peut avoir comme conséquence la non couverture de sous-régions et/ou le partitionnement du réseau. Les définitions possibles et proposées dans la littérature, nous citons les suivantes :

- La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie.
- La durée jusqu'à ce que le premier CH (cluster Head) épuise toute son énergie.
- La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie.

## II.3 Consommation d'énergie d'un nœud CSF :

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de CSF. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les

problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement dû aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [16].

### II.3.1 Energie de capture :

Un capteur peut être équipé par multiples senseurs (humidité, la chaleur, les mouvements, la position,...). De ce fait les sources de consommation d'énergie pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture [17].

### II.3.2 Energie de traitement :

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie : 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 au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, 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.

### II.3.3 Energie de communication :

L'énergie de communication (réception/émission) représente la plus grande proportion d'énergie totale consommée au niveau d'un nœud capteur. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée.

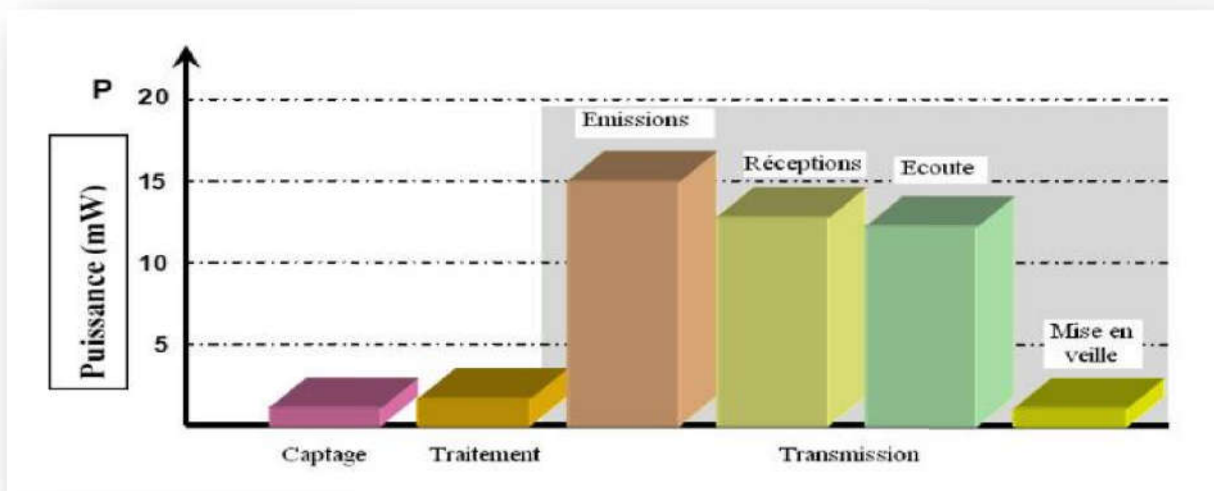


Figure II.1 : Consommation d'énergie en capture, traitement et transmission.

## II.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie :

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

### II.4.1 Etat du module radio :

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil [18].

✓ Etat actif : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.

✓ Etat réception : la radio reçoit un paquet.

✓ Etat transmission : la radio transmet un paquet.

✓ Etat sommeil : la radio est mise hors tension.

Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition.

Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC.

### II.4.2 Accès au medium de transmission :

La couche MAC joue un rôle important pour la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie. Dans cette section, nous allons analyser les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC [19].

#### II.4.2.1 La retransmission :

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. La retransmission des paquets perdus peut engendrer une perte significative de l'énergie.

#### II.4.2.2 L'écoute active :

L'écoute active (idle listening) du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie.



Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

#### II.4.2.3 La surécoute :

Le phénomène de surécoute (overhearing) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (fig. II.2). La surécoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.

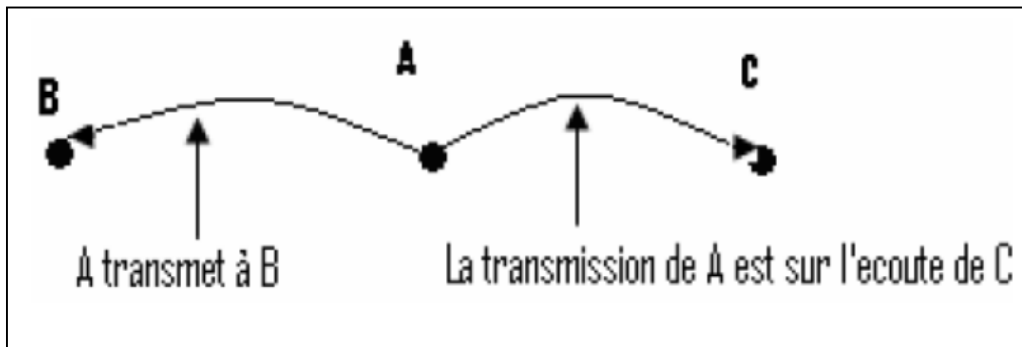


Figure II.2 : La surécoute dans une transmission.

#### II.4.2.4 La surcharge :

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

#### II.4.2.5 La surémission :

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

#### II.4.2.6 La taille des paquets :

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquiescement) générés augmente l'over Head. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille.

### II.4.3 Modèle de propagation radio :

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion

par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de  $1/d^n$ , où  $d$  est la distance entre l'émetteur et récepteur,  $n$  un exposant de perte d'un chemin (exemple :  $n=2$  dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [20].

#### **II.4.4 Routage des données :**

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

#### **II.5 Les sources de gaspillage d'énergie :**

Nous appelons surconsommation d'énergie toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud capteur. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses, elles peuvent être engendrées lors de la détection lorsque celle-ci est mal gérée.

Il existe de plusieurs phénomènes qui surconsommation de l'énergie surtout au niveau MAC. Où déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et on été recensés dans [21, 22] :

##### **II.5.1 Les collisions :**

Elles sont la première source de perte d'énergie. Quand deux trames sont émises en même temps et se heurtent, elles deviennent inexploitable et doivent être abandonnées. Les retransmettre par la suite, consomme de l'énergie. Tous les protocoles MAC essaient à leur manière d'éviter les collisions. Les collisions concernent plutôt des protocoles MAC avec contention.

##### **II.5.2 L'écoute à vide (idle listening) :**

Un nœud dans l'état « idle » est prêt à recevoir un paquet, mais il n'est pas actuellement en train de recevoir quoi ce soit. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode « idle ». Eteindre la radio est une solution, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester « raisonnable ».

##### **II.5.3 L'écoute abusive (overhearing) :**

Cette situation se présente quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Le coût de l'écoute abusive peut être un facteur dominant de la perte d'énergie

quand la charge de trafic est élevée et la densité des nœuds grande, particulièrement dans les réseaux « mostly-on ».

#### II.5.4 L'overmitting :

Un nœud envoie des données et le nœud destinataire n'est pas prêt à les recevoir.

#### II.5.5 L'over Head des paquets de contrôle :

L'envoi, la réception, et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie. Comme les paquets de contrôle ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

#### II.6 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie :

Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSFs, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant (fig. II.3) donne un aperçu global de ces mécanismes :

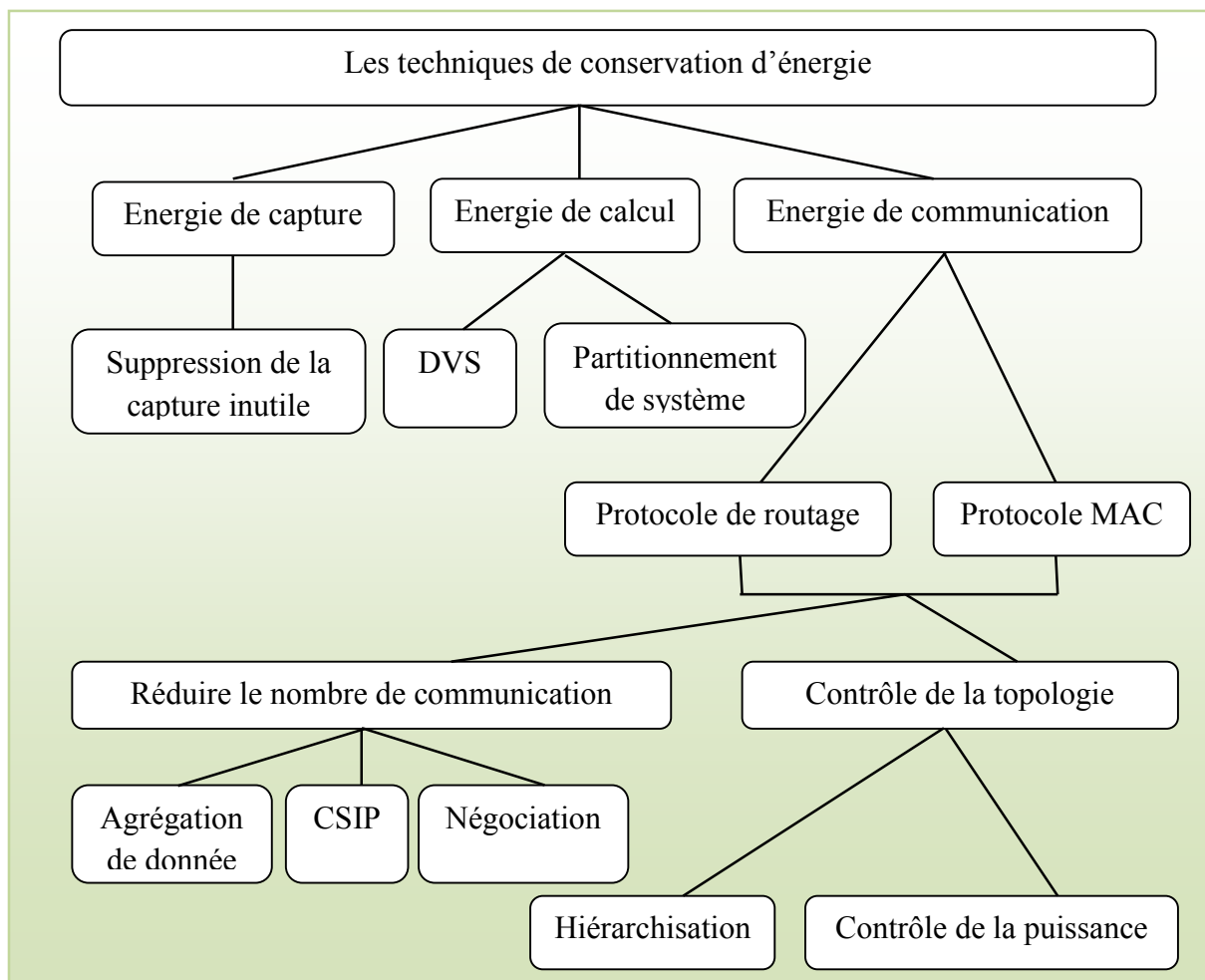


Figure II.3 : Les techniques de conservation d'énergie.

L'énergie du capteur peut être économisée soit au (a) niveau de la capture, (b) niveau de traitement ou au (c) niveau de la communication.

**A.** La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les fréquences et les durées de captures.

**B.** L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :

- L'approche DVS (dynamique Voltage Scaling) [23] qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.

- L'approche de partitionnement de système qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul [24].

**C.** La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la sous-couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques: l'agrégation de données, la négociation et à la technique CSIP (Collaborative Signal and Information Processing).

Cette dernière technique est une discipline qui combine plusieurs domaines [25]: la communication et le calcul à basse puissance, le traitement de signal, les algorithmes distribués, la tolérance aux fautes, les systèmes adaptatifs et la théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont le but de réduire le nombre d'émission/réception des messages.

## **II.7 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales approches d'économie d'énergie dans les RCSFs, l'axe des techniques de conservation d'énergie vise à réduire le duty-cycle des nœuds. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Alors, les réseaux de capteurs doivent donner de l'importance à la conservation d'énergie.

# Chapitre III

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

---

### Sommaire

---

III.1 Introduction.

III.2 Routage.

III.3 Contraintes de routage dans les RCSFs.

III.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs.

III.5 Exemples des protocoles de routage proposés pour les RCSFs.

III.6 PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended).

III.7 Conclusion.

### III.1 Introduction :

Dans les RCSFs, les capteurs sont déployés en grand nombre pour surveiller un tel phénomène et faire remonter l'information à un centre de contrôle distant. Pour atteindre cette finalité, les capteurs ont la capacité de communiquer et collaborer entre eux pour acheminer l'information collectée à la station de base en garantissant sa fiabilité et en empruntant le plus court chemin entre le nœud qui a détecté ce phénomène et la station de base. Cette opération permet le routage de l'information entre le nœud détecteur et le nœud puit et elle consiste à trouver les routes les plus courtes.

Dans ce chapitre nous allons classifier protocoles de routage et citer quelques contraintes rencontrés.

### III.2 Routage :

Le routage est le mécanisme par lequel des chemins sont sélectionnés dans un réseau pour acheminer les données d'un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. Le routage est une tâche exécutée dans de nombreux réseaux, tels que le réseau téléphonique, les réseaux de données électroniques (comme internet), et les réseaux de transports. Sa performance est importante dans les réseaux décentralisés, c'est-à-dire où l'information n'est pas distribuée par une seule source, mais échangée entre des agents indépendants [26].

Le terme routage désigne l'ensemble des mécanismes mis en œuvre dans un réseau pour déterminer les routes qui vont acheminer les paquets d'un terminal émetteur à un terminal récepteur [27]. On distingue généralement deux entités : **l'algorithme de routage et le protocole de routage**.

L'algorithme de routage est la partie du logiciel de la couche réseau qui a la responsabilité de décider sur quelle ligne de sortie un paquet entrant doit être retransmis. Le but d'un algorithme de routage est de permettre le calcul de route entre une source et une destination au sens d'un certain critère (plus court chemin par exemple), et la diffusion des informations nécessaires à ce calcul. Un protocole de routage est un ensemble de règles s'appliquant au format et à la signification des trames, paquets ou message échangés entre entités paires au sein de la couche réseau [28].

### III.3 Contraintes de routage dans les RCSFs:

Le routage dans les réseaux de capteurs diffère de celui des réseaux Ad Hoc dans les points suivants [29]:

✓ Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds.

- ✓ Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées depuis des sources multiples vers la destination finale « station de base ».
- ✓ Les différents capteurs peuvent générer produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- ✓ Les nœuds capteurs exigent ainsi une gestion soignée des ressources.

En raison de ces différences, de nouveaux protocoles de routage ont été proposés dans les réseaux de capteurs.

### III.4 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs :

Les protocoles de routage dans les réseaux peuvent être classés selon deux concepts : la structure de réseau et le type de protocole [30]. Le schéma suivant résume une classification de protocole de routage :

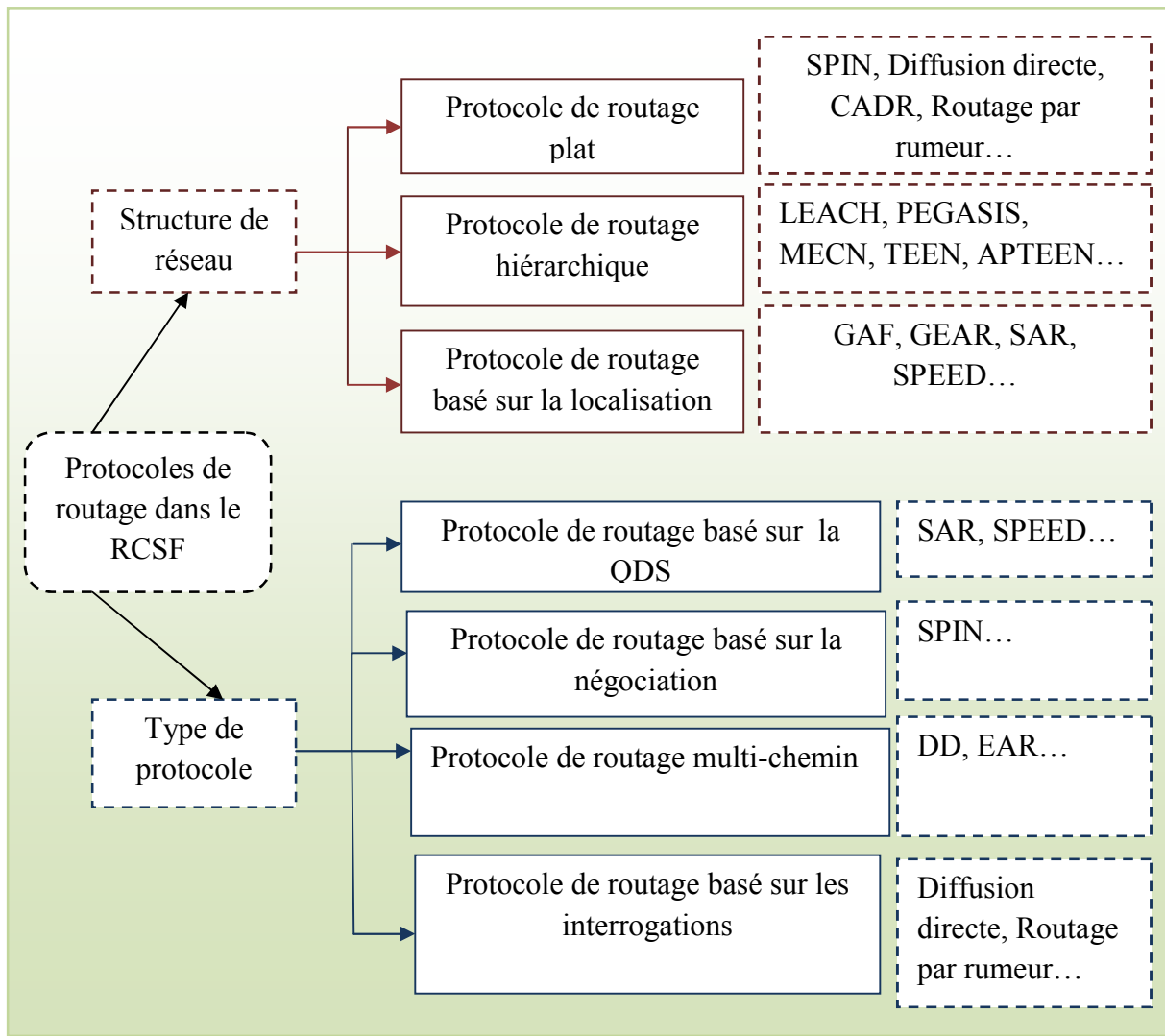


Figure III.1 : Classification des protocoles de routage pour les RCSFs selon la structure du réseau et le type de protocole.

### III.4.1 Selon la structure du réseau :

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classés en trois catégories : protocoles à plat (Flat based routing), protocoles hiérarchiques (Hierarchical based routing) et protocoles basés sur la localisation (Location based routing).

#### III.4.1.1 Routage à plat :

Comme illustré sur la fig.III.2, dans cette catégorie de protocoles, les nœuds ont le même rôle et ils collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. En raison du grand nombre de tels nœuds, il n'est pas faisable d'affecter un identificateur à chaque nœud [17, 31].

Les protocoles suivants : SPIN, CADR,...sont des exemples de protocoles de routage à plat.

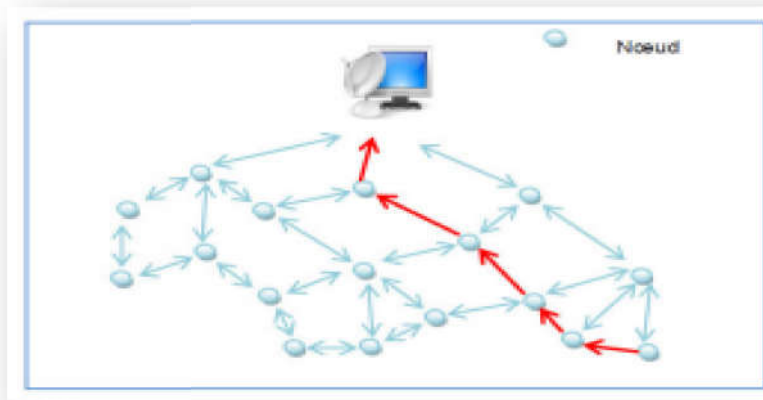


Figure III.2 : Protocoles de routage à plat.

#### ❖ **Avantage :**

- La simplicité d'où la possibilité d'établir des communications sans surcoût où chaque nœud n'aura besoin que des informations de ses voisins directs.
- Les réseaux à plat sont scalables du fait que chaque nœud participe également à la tâche de routage et puisque les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.

#### ❖ **Inconvénients :**

- L'épuisement des ressources en énergie des nœuds proches de la station de base car tout le trafic vers cette dernière passe obligatoirement par eux.

#### III.4.1.2 Routage hiérarchique :

Comme illustré sur la fig.III.3, dans une architecture hiérarchique, les nœuds sont regroupés en cluster et chaque cluster est orchestré par un cluster Head (CH) ou chef de cluster. C'est ce dernier qui communique les données reçues des nœuds de son cluster à la



station de base. Un protocole de routage doit être conçu de telle sorte qu'il prend en considération ce découpage hiérarchique pour assurer la bonne délivrance des paquets au destinataire [32, 17].

Les protocoles suivants : LEACH, PEGASIS,... sont des exemples de protocoles de routage hiérarchique.

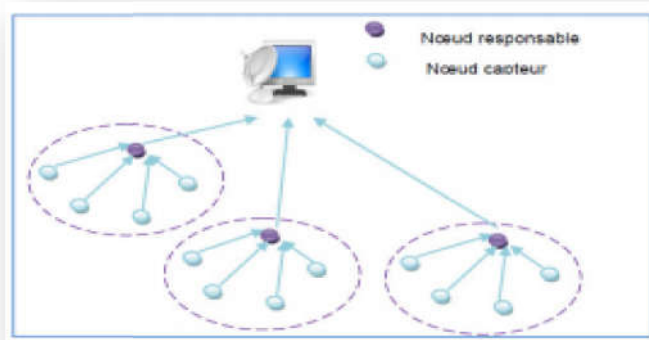


Figure III.3 : Protocoles de rouage hiérarchique.

❖ **Avantage :**

- Les données sont envoyées vers la station de base par le (CH), ce qui minimise considérablement d'over Head de communication.

❖ **Inconvénients :**

- Les nœuds élus comme des CHs consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau, car ce sont eux qui achemine les données à la station de base.

### III.4.1.3 Routage basé sur la localisation (Routage géographique) :

Un routage est dit géographique lorsque les décisions d'acheminement sont basées sur la position des nœuds. Ce type de routage utilise les informations sur l'emplacement ou la localisation des nœuds capteurs. Généralement ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds donnés, et estimer des lors la puissance nécessaire pour émettre les paquets. La distance entre deux nœuds voisins peut être estimée à partir de la puissance du signal en réception. Les coordonnées des nœuds voisins sont obtenues aussi par échange d'information entre eux. La position des nœuds peut être récupérée directement en utilisant des systèmes de localisation, tels que le GPS (Global Position System) [33, 34]. Cette technique de routage consiste à router l'information vers le nœud dont on cherche après avoir obtenu la zone dans laquelle il se trouve.

Les protocoles suivants : GAF, GEAR, SAR sont des exemples de protocoles de cette classe.

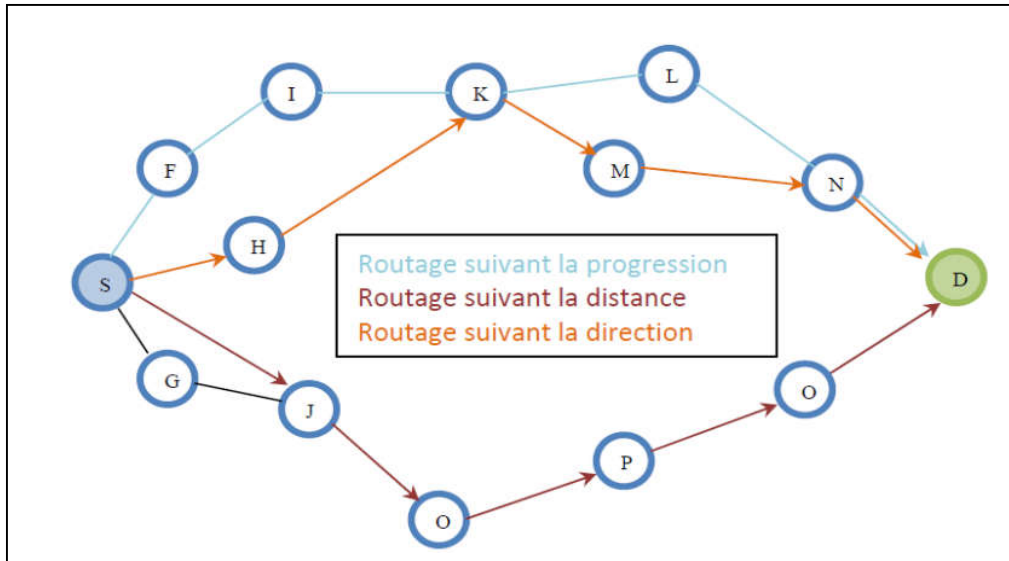


Figure III.4 : Protocoles de routage basé sur la localisation.

❖ **Avantage :**

- Avec les informations de positionnement, le réseau minimise de l'énergie grâce facilité de calcul des routes énergétiquement optimales.

❖ **Inconvénients :**

- La nécessité d'équiper les nœuds capteurs avec un système de localisation par satellite comme le GPS qui consomment énormément d'énergie.

**III.4.2 Selon les types de protocoles :**

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories : routage basé sur la qualité de service "QDS" (QOS based routing), routage basé sur la négociation (Negotiation based routing), routage basé sur des multi-chemins (Multipath based routing), et routage basé sur les interrogations.

**III.4.2.1 Routage basé sur la QDS :**

Dans cette catégorie, le réseau bascule entre l'énergie et la qualité des données transmises. Ces qualités de services peuvent être, 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 [35, 32].

Les protocoles suivants : SAR, SPEED sont des exemples de protocoles de cette catégorie.

**❖ Avantage :**

- La prise en compte des délais de transmissions rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications surveillance (centrales nucléaires, applications militaires, etc.).
- La qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions.
- Augmentation du taux d'arrivée des paquets à la station de base.

**❖ Inconvénients :**

- Cette approche ne répond pas en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QDS.
- Pas de prise en compte de la sécurité qui est l'une des critères de la QDS.

**III.4.2.2 Routage basé sur la négociation :**

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources [36].

Le protocole SPIN est d'exemple de protocole de cette famille.

**❖ Avantage :**

- 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.

**❖ Inconvénients :**

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds produit une congestion du réseau ainsi leurs ressources énergétiques disponibles.
- Le scénario de négociation entre les nœuds produit un retard pour délivrer les données à la station de base.

**III.4.2.3 Routage multi chemins :**

Dans ce type protocole, le routage permet de faire face à l'un des problèmes les plus rencontrer avec les protocoles de routage actuels. Le fait de trouver un simple chemin optimal en énergie et l'utiliser fréquemment pour toutes les communications provoque l'épuisement des batteries des nœuds qui constituent ce chemin. Par conséquent, le réseau sera partitionné et ses performances en termes de tolérance aux pannes seront dégradées. La tolérance aux pannes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire soit défaillant.

De ce fait, le routage adopté par les protocoles de cette famille consiste à maintenir plusieurs chemins depuis chaque capteur vers la station de base, ce qui permet de garantir la présence de plus d'un chemin fiable pour transmission, et offre une reprise rapide de transfert de données en cas de panne [17].

Les protocoles DD, EAR sont d'exemples des protocoles de cette catégorie.

❖ **Avantage :**

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

❖ **Inconvénients :**

- 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.

#### **III.4.2.4 Routage basé sur les interrogations :**

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud « sink » [29].

Les protocoles DD, RR sont d'exemples des protocoles de routage basé sur les interrogations.

### **III.5 Exemples des protocoles de routage proposés pour les RCSFs :**

#### **III.5.1 Protocoles de routage hiérarchique :**

##### **III.5.1.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) :**

LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des CHs locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les CHs plutôt que par tous les nœuds de capteurs [37].

LEACH suppose que chaque nœud du réseau peut communiquer directement avec le puits, alors que, les nœuds non CHs ne peuvent communiquer qu'avec leurs CHs choisis, en utilisant la technique TDMA instaurée par ce dernier. Cette technique permet de minimiser les collisions en allouant à chaque nœud un temps privé pour transmettre ses données vers son

CH. LEACH préconise, également, une agrégation de données au niveau des CHs pour plus de conservation d'énergie [38].

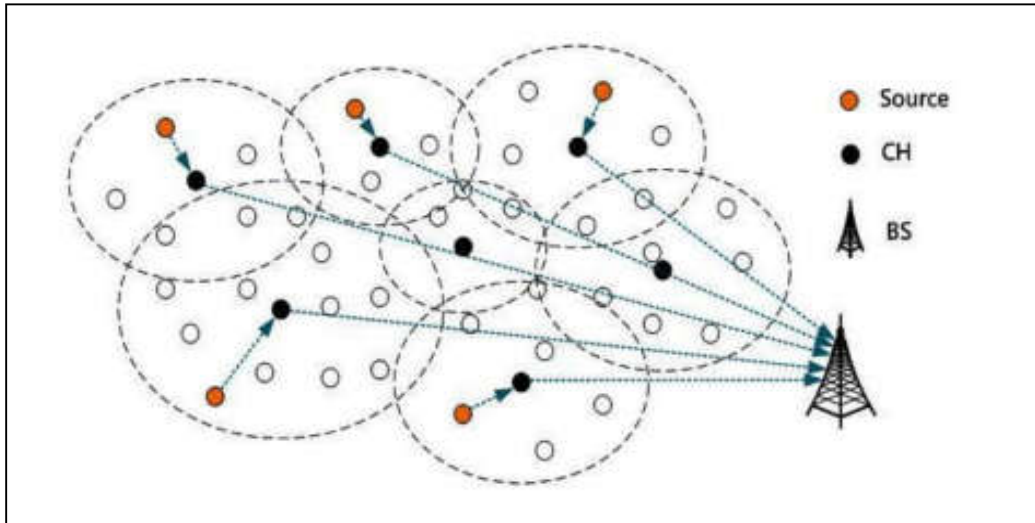


Figure III.5 : Le protocole LEACH.

**III.5.1.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems) :**

PEGASIS est une version améliorée du protocole LEACH. PEGASIS forme des chaînes plutôt que des clusters de nœuds de capteurs afin que chaque nœud transmette et reçoive uniquement des données d'un voisin. Un seul nœud est sélectionné à partir de cette chaîne pour transmettre à la station de base. L'idée de PEGASIS est qu'il utilise tous les nœuds pour transmettre ou recevoir des données avec ses plus proches voisins. Il déplace les données reçues de nœud à nœud, puis les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent tous la station de base. Donc, chaque nœud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, ainsi que responsable pour transmettre l'ensemble des données recueillies et fusionnées par la chaîne de nœuds au niveau de la station de base [39].

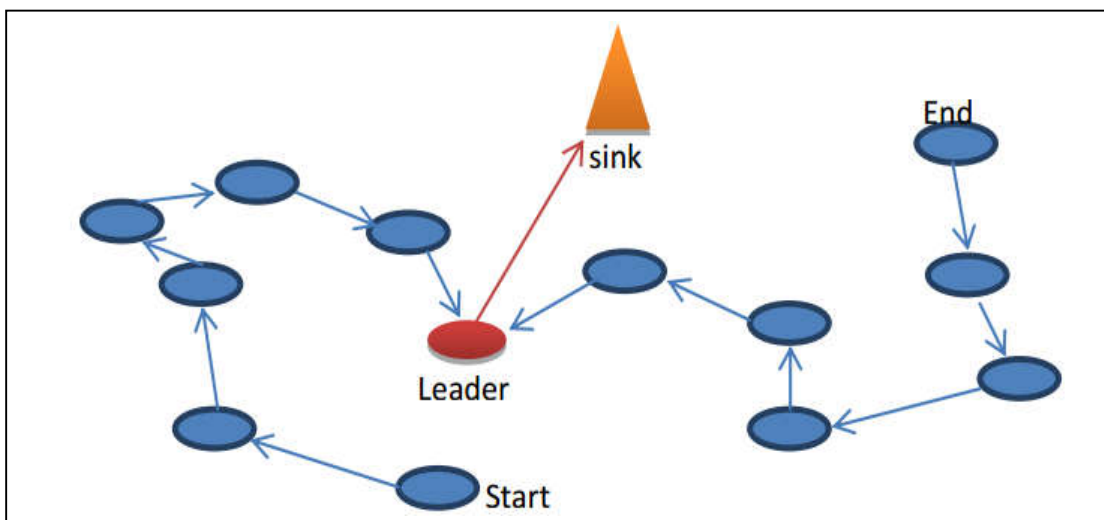


Figure III.6 : Le protocole PEGASIS.

### III.5.1.3 TEEN et APTEEN :

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) est conçu pour être sensible à des changements soudains des attributs tels que la température. La réactivité est importante pour les applications critiques dont le réseau fonctionne dans un mode réactif. L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds forment des clusters et ce processus va se répéter jusqu'à ce que la station de base soit atteinte.

APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection des captures périodique de données et qui réagit aux événements critiques. Quand la station de base forme des clusters, les CHs diffusent les attributs, les valeurs des seuils, ainsi que le calendrier de transmission à tous les nœuds. Le CH effectue également l'agrégation de données afin d'économiser l'énergie [40].

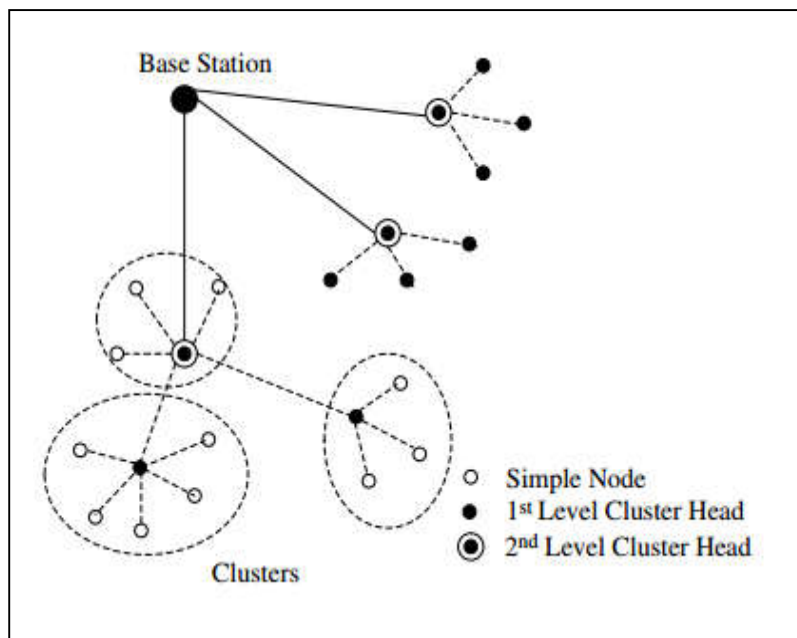


Figure III.7 : protocole TEEN et APTEEN.

### III.5.2 Protocoles de routage non hiérarchique :

#### III.5.2.1 DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) :

Est un protocole proactif unicast mobile ad hoc qui est basé sur l'algorithme de Bellman-Ford [41]. Dans les tables de routage de DSDV on trouve :

- ✓ Toutes les destinations possibles.
- ✓ Le nombre de nœuds (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
- ✓ Le numéro de séquence SN qui correspond à un nœud destination.

Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes et nouvelles routes et pour éviter la formation de boucles de parcours. Chaque nœud transmet périodiquement des mises à jour, y compris des informations de routage à ses voisins immédiats.

**III.5.2.2 AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector) :**

Le protocole AODV représente essentiellement une amélioration de l’algorithme DSDV dans le contexte réactif. Il est spécialement conçu pour les réseaux mobiles pour créer et découvrir les liaisons entre la source et la destination [42, 43]. Il est utilisé pour des routages unicast et multicast en utilisant des requêtes de type (route request/route reply). Avec AODV, chaque nœud a une table de routage qui donne des informations sur ses voisins, la table joue un rôle dans le choix d’un voisin qui va transmettre les paquets de la source vers la destination. Lorsque la source a des données à envoyer vers une destination, elle diffuse une requête de type Route Request (RREQ). Lorsque le nœud reçoit RREQ, il met à jour ses informations pour le nœud source et il ajoute une nouvelle route valide à sa table de routage pour atteindre la source qui a envoyé RREQ. Lorsque RREQ arrive à la destination, celle-ci génère une réponse de type Route Reply (RREP). RREP est renvoyé vers la source comme le montre la fig.III.8. Chaque nœud possède un numéro de séquence qui permet de choisir la route la plus récente et de maintenir la consistance des informations de routage [44].

Avec AODV, s’il existe plusieurs routes possibles de la source vers la destination, AODV choisit la route la plus courte (la route où il y a un minimum de sauts). Si un tour de routage échoue, la source relance un nouveau RREQ avec un temps T plus important. Si plusieurs séries de RREQ échouent, alors aucune route ne peut être trouvée [42, 46].

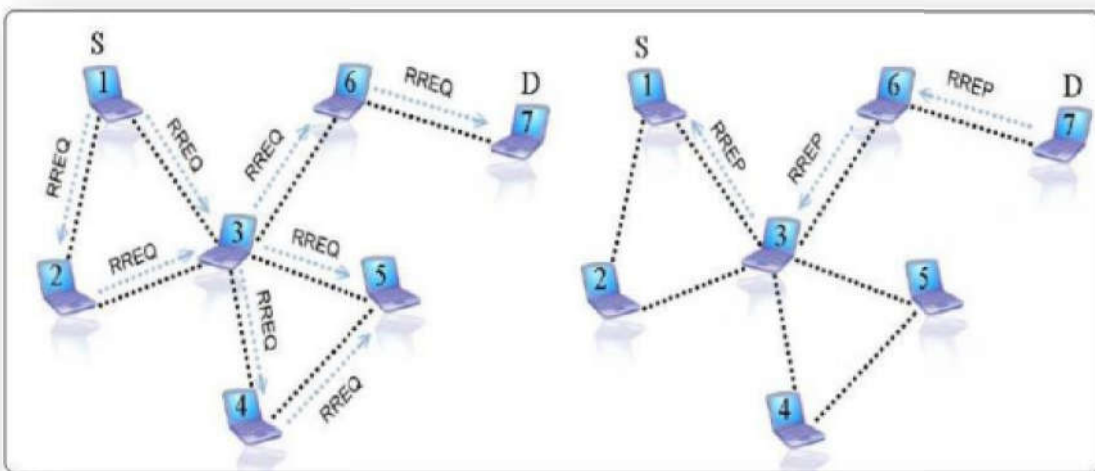


Figure III.8 : Les deux requêtes RREQ et RREP en AODV.

**III.5.2.3 SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) [47]:**

SPIN est un protocole de type centre-donnée base sur le modèle de négociation et utilise pour résoudre les problèmes suivants :

- ✓ Le chevauchement.
- ✓ L'implosion.
- ✓ L'ignorance des ressources.

Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- ✓ Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- ✓ Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- ✓ En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.

Lorsque le nœud s'aperçoit que son énergie est descendu sous un certain seuil, il change son mode de fonctionnement, et ne répond à aucun message ADV.

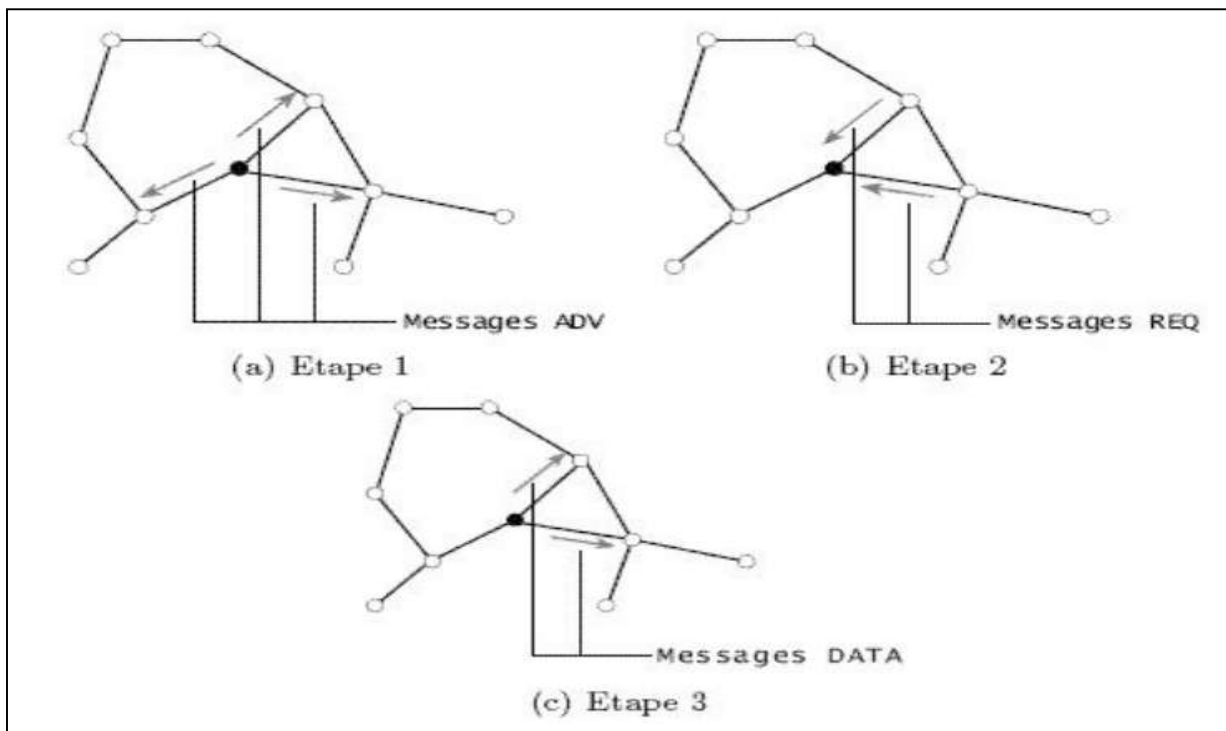


Figure III.9 : Le protocole SPIN.

Le tableau suivant présente la comparaison de protocoles de routage décrit avant :



Tableau III.1 : Comparaison de quelque protocole de routage dans le RCSF.

	LEACH	PEGASIS	TEEN et APTEEN	DSDV	AODV	SPIN
<b>Type de réseau</b>	RCSF	RCSF	RCSF	Ad Hoc	Ad Hoc	RCSF
<b>Classification</b>	Hiérarchique	Hiérarchique	Hiérarchique	Plat	Plat	Plat
<b>Chemin de transmission</b>	Un seul saut	Multi-saut	Multi-saut	Multi-saut	Multi-saut	Multi-saut
<b>Efficacité énergétique</b>	Haut	Maximum	Haut	Limité	Limité	Limité
<b>Métrique</b>	Energie	Energie	Energie	Chemin	Chemin	Energie
<b>Temps réel</b>	Assez bien	Assez bien	Bien	Bien	Très bien	Assez bien
<b>QDS</b>	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
<b>Basée sur requête</b>	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
<b>Over Head</b>	Elevé	Basse	Elevé	Elevé	Elevé	Basse

### III.6 PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended) :

Vibha et al. [48] ont proposé un protocole basé sur une chaîne appelé PEGASIS-E qui est une extension de protocole PEGASIS [39]. L'idée de base de ce protocole est que les nœuds seront organisés en chaîne. Ainsi, les nœuds transmettent et communiquent uniquement avec leurs voisins les plus proches. Le seul nœud qui envoie des données de la chaîne directement à la SB est le leader. Le critère de formation de chaîne dans PEGASIS-E est basé sur la distance moyenne entre les nœuds de capteur.

Le protocole PEGASIS-E se compose de trois phases: phase de construction de la chaîne, phase de sélection du leader et la phase de transmission de données.

- **Phase de construction de la chaîne:** Dans cette phase, les étapes suivantes sont effectuées pour former la chaîne:

- La SB diffuse sur tout le réseau un message hello pour obtenir des informations de base sur le réseau, telles que les identifiants des nœuds, la distance de chaque nœud à la SB et la distance entre les nœuds.
- Définir le nœud le plus éloigné de la SB en tant que nœud final. Il rejoint la chaîne en premier et est étiqueté en tant que nœud 1.
- Calculer la distance moyenne entre les nœuds vivants ( $D_{avg}$ ), et définir la comme étant la portée radio du nœud final.
- Joindre tous les nœuds de la chaîne qui se trouvent dans la portée radio et qui n'ont pas encore rejoint le réseau (la chaîne).
- Comparer la distance de tous les nœuds joints dans la chaîne pour calculer le nœud de distance minimale.
- Définir le nœud sélectionné comme nouveau nœud d'extrémité.
- Répétez les trois dernières étapes jusqu'à ce que tous les nœuds aient rejoint la chaîne.

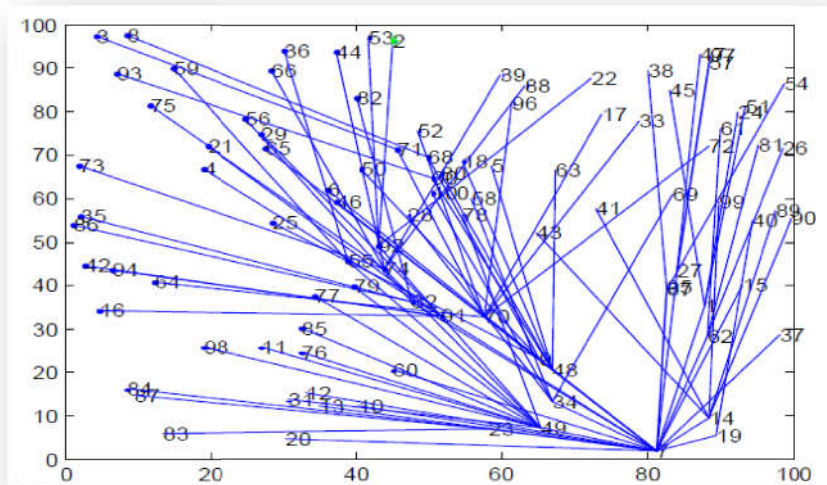


Figure III.10 : Exemple d'une chaîne formée par la phase de construction de PEGASIS-E [48].

- **Phase de sélection du leader:** La sélection du leader dans PEGASIS-E est identique à celle de PEGASIS [39].

- **Phase de transmission de données:** Le leader initie une approche de transmission de jeton pour démarrer la transmission de données à partir de nœuds qui ne possèdent qu'un seul lien. Chaque nœud transmet ses propres données détectées à son nœud voisin de la chaîne pendant leurs slots attribués par la technique TDMA. Ensuite, les nœuds voisins fusionnent les données reçues avec leurs propres données et les transmettent plus loin vers le leader. Un tour

se termine jusqu'à ce que SB reçoive les données du leader. De plus, le protocole PEGASIS-E suppose que la chaîne est reconstruite lorsqu'un nœud de la chaîne meurt.

Le protocole PEGASIS-E offre de meilleures performances en termes de dissipation d'énergie et de quantité d'informations envoyées à la SB par rapport au protocole PEGASIS classique.

### **III.7 Conclusion :**

Le routage dans les RCSFs forme un axe de recherche intéressant. Tout au long de ce chapitre, nous avons effectué une étude de quelques protocoles de routage pour les RCSFs qui visent à conserver le maximum d'énergie. L'objectif principal d'un protocole de routage pour un RCSF est l'établissement correct et efficace de routes entre une paire de nœuds afin que les messages puissent être acheminés et permet aux nœuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers la station de base.

# *Chapitre IV*

## *Implémentation du protocole PEGASIS-E*

---

### Sommaire

---

IV.1 Introduction.

IV.2 Le choix de langage de programmation.

IV.3 Le modèle du système.

IV.4 Algorithme détaillé de notre programme pour l'implémentation du Protocole PEGASIS-E.

IV.5 Implémentation de protocole PEGASIS-E.

IV.6 Conclusion.

## IV.1 Introduction :

Dans le présent chapitre, nous présentons la mise en œuvre et la simulation du protocole de routage PEGASIS-E (Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended) [48]. La phase implémentation est la phase la plus importante de notre mémoire car elle permet de tester, simuler et valider les approches Chain-Based en termes d'efficacité énergétique. Nous avons sélectionné l'environnement MATLAB car il est très simple et a des moyens faciles de créer des GUI (graphique interface utilisateur).

Nous présentons aussi notre l'environnement de simulation que nous avons utilisé pour cette simulation. Enfin, nous présentons les différents scenarios de simulation et résultats obtenus.

## IV .2 Le choix de langage de programmation :

Nous avons choisi le langage de programmation MATLAB pour plusieurs raisons [49]:

- MATLAB est un langage de haut niveau pour l'informatique scientifique et technique.
- Programmation plus rapide et plus rapide pour le compte et la présentation.
- Environnement de développement pour la gestion du code, des fichiers et des fichiers de données.
- Fonctions graphiques 2D et 3D pour la visualisation des données graphiques pour la visualisation des données et outils conçus pour créer des schémas personnalisés. Fonctions graphiques permettant de visualiser les données graphiques 2-D et 3-D.
- Outils supplémentaires conçus pour répondre aux besoins spécifiques de nombreux ingénieurs et scientifiques.
- Applications personnalisées pour l'ajustement de courbes, la classification de données, l'analyse de signaux et de nombreuses autres tâches spécialisées.

Les caractéristiques de la machine utilisée dans la simulation sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Caractéristique matérielle.

Hardware	Caractéristiques
Processeur	Intel (R) Core (TM) i3- 6006U CPU @ 2.00GHz, 2.00GHz.
Mémoire (RAM)	4.00Go.
Opération système	Microsoft Windows7 Professional 64 bits.

### IV.3 Le modèle du système :

La simulation du protocole PEGASIS-E est effectuée sur un réseau de CSF qui présente les caractéristiques suivantes :

#### IV.3.1 Le modèle de réseau :

- les capteurs sont distribués dans un espace à deux dimensions.
- les RCSF est fixe et homogène dans la capacité de traitement, la capacité de communication et d'information.
- L'énergie initiale est normalisée pour tous les nœuds et est incapable de se recharger.

#### IV.3.2 Le modèle de dissipation de l'énergie :

La tension du nœud est modifiée et transmise en fonction de l'émetteur ou du récepteur, ce qui est lié à la valeur du Seuil Hard et à la valeur seuil de la différence entre le nouveau Seuil Soft où elle doit être supérieure ou égale à 5.

Dans un premier temps, le seuil est reçu de CH ou de SB dans le premier cas, mesuré uniquement au seuil de température, c'est-à-dire s'il dépasse ce seuil.

Dans les autres cas, le capteur est mesuré au seuil de température et à la différence entre le grade précédent et transmis par CH, SB le plus proche de celui-ci.

Chaque fois que nous étudions l'évolution de la perte d'énergie selon que le nœud est vivant (positif) ou mort (nul ou négatif), nous en concluons que le nœud est deux cas dans lesquels la capacité de recevoir la réception et la transmission ou trois cas CH reçoit des informations du nœud et leur envoie des valeurs seuils (ST / HT) et envoie les informations au SB ou au CH le plus proche, selon les règles suivantes :

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec}(L, d) + L * \varepsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \varepsilon_{mp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad \text{Equation IV.1}$$

- $E_{elec}$  : L'énergie suffisante pour transmettre ou recevoir un seul bit.
- $\varepsilon_{fs}$  : Facteur de l'amplification correspond au modèle « free space channe ».
- $\varepsilon_{mp}$  : Facteur de l'amplification correspond au modèle « multipath fading channel ».
- $E_{da}$  : l'énergie d'agrégation de donnée.
- $L$  : La taille d'un message.
- $d_0$  : La distance limite pour laquelle les facteurs d'amplification changent de valeur.
- $d$  : La distance entre l'émetteur et le récepteur.

- Pour recevoir un message de L bits, le récepteur consomme :

$$E_{RX} = L * E_{elec}$$

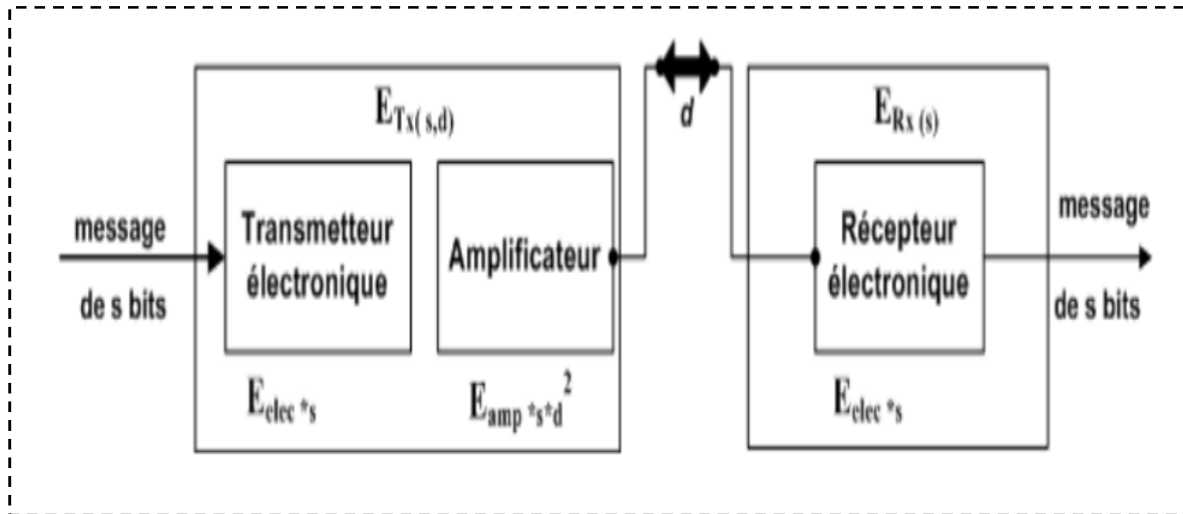


Figure IV.1 : Le modèle de dissipation de l'énergie.

#### IV.4 Organigramme pour l'implémentation du protocole PEGASIS-E :

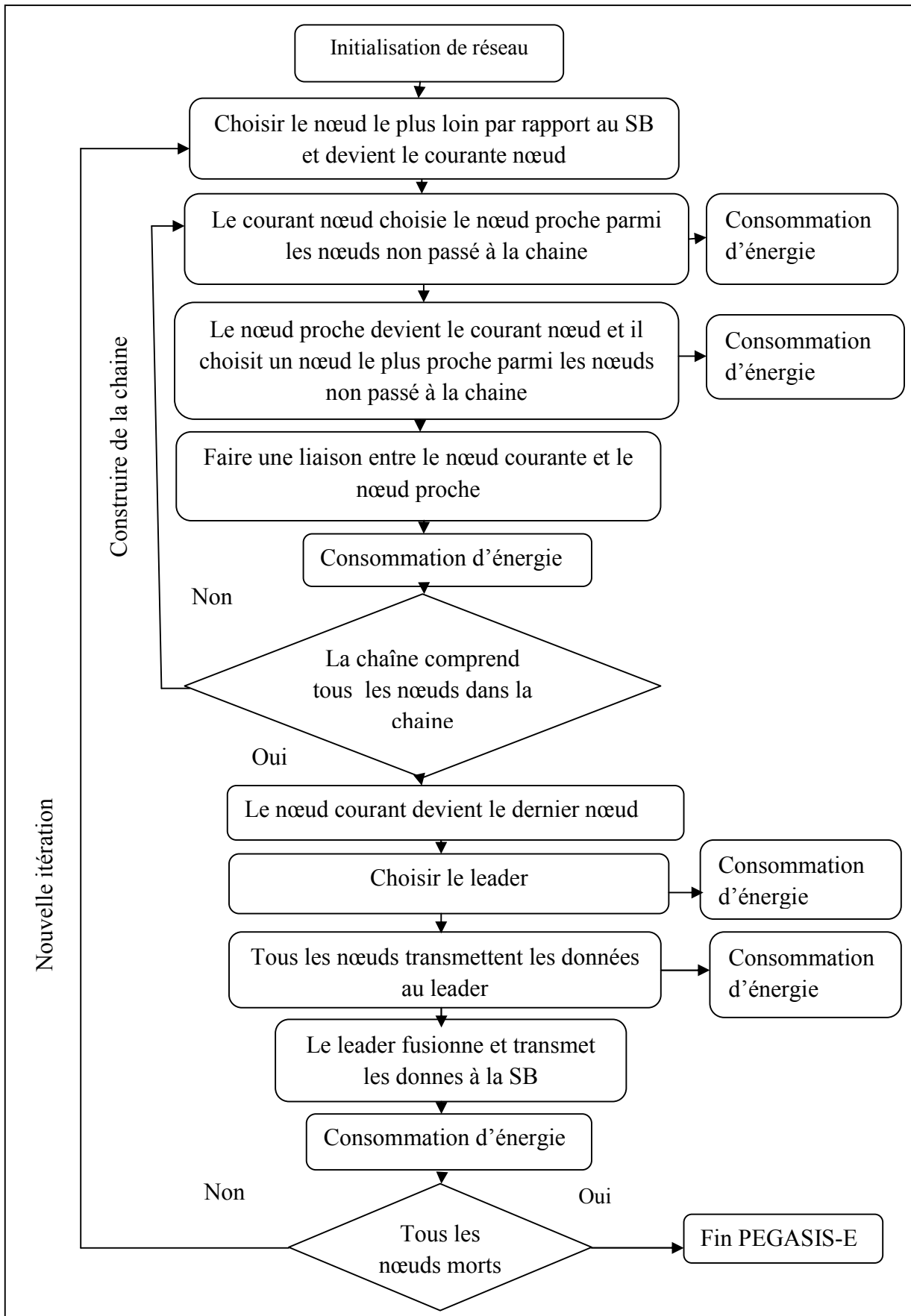


Figure IV.2 : Organigramme du protocole PEGASIS-E.



## IV.5 Implémentation de protocole PEGASIS-E :

Dans ce qui suit nous allons décrire l'interface utilisée pour la simulation du Protocole PEGASIS-E et ainsi que l'analyse des résultats obtenues de la simulation en les comparant avec les uns de protocole LEACH.

### IV.5.1 Description de l'interface "Simulateur RCSF" :

"Simulateur RCSF" se constitue de trois parties principales: partie de paramètres de simulation à gauche, partie de zone de simulation au milieu et la partie de résultats de simulation à droite.

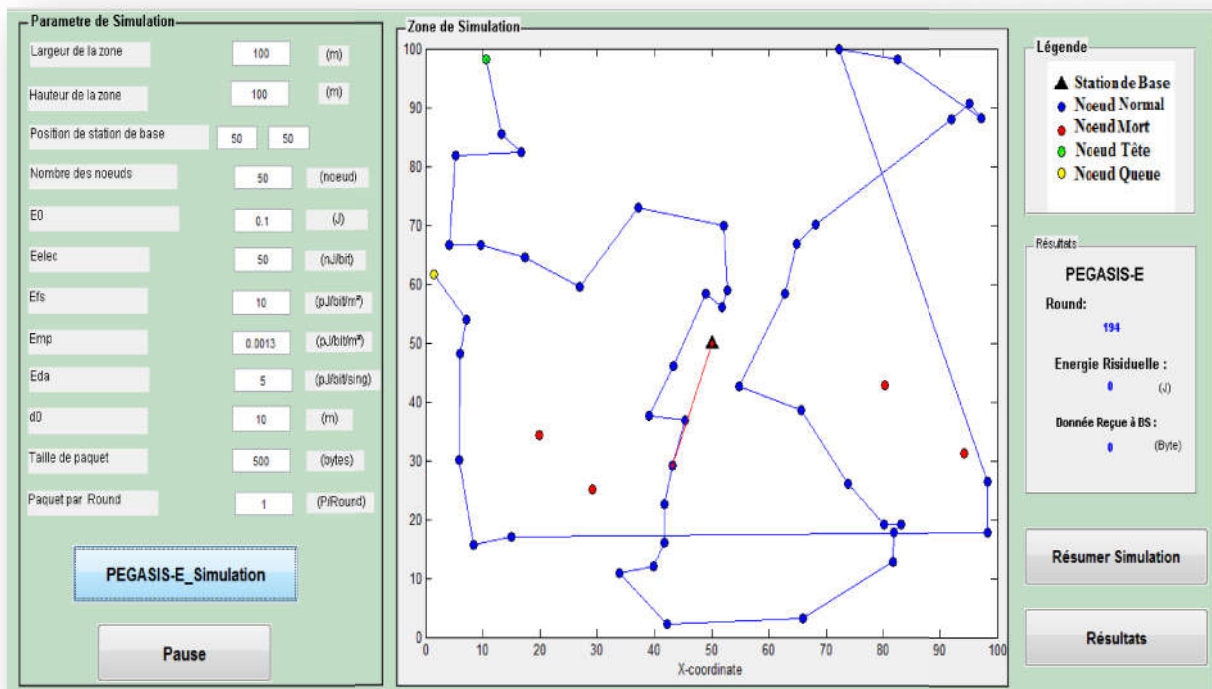


Figure IV.3: L'interface de l'environnement de simulation.

#### A. Partie de paramètres de simulation :

Pour simuler le protocole PEGASIS-E en utilisant l'interface de l'environnement de simulation, on doit saisir tous les paramètres de simulation. D'abord, on spécifie deux paramètres importants pour n'importe quelle simulation d'un protocole, qui sont les démentions de la zone de simulation et la position de la station de base. Après, on entre le nombre des nœuds à distribuer dans la zone, les différentes énergies consommées (l'énergie initiale  $E_0$ ,  $E_{elec}$ ,  $\epsilon_{fs}$ ,  $\epsilon_{mp}$ ,  $E_{da}$ ), la taille de paquet et le nombre de paquets à transmettre par un seul round. En fin, on clique sur le bouton "PEGASIS-E\_Simulation" pour lancer la simulation comme on peut utiliser le bouton "Pause" pour pauser ou reprendre la simulation.

Paramètre	Valeur	Unité
Largeur de la zone	100	(m)
Hauteur de la zone	100	(m)
Position de station de base	50 50	
Nombre des noeuds	50	(noeud)
E0	0.1	(J)
Eelec	50	(nJ/bit)
Efs	10	(pJ/bit/m²)
Emp	0.0013	(pJ/bit/m²)
Eda	5	(pJ/bit/sing)
d0	10	(m)
Taille de paquet	500	(bytes)
Paquet par Round	1	(P/Round)

**PEGASIS-E\_Simulation**

**Pause**

Figure IV.4: Paramètres de simulation.

**B. Partie de zone de simulation :**

Cette partie se divise en deux sections:

- ✓ La première section représente la zone de simulation.

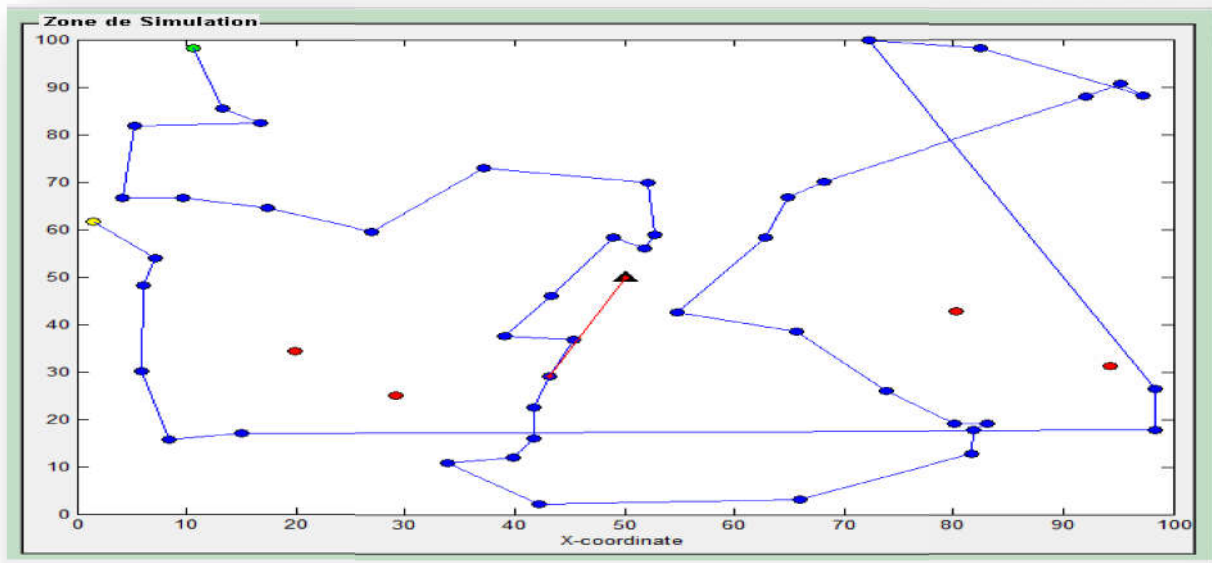


Figure IV.5: Zone de simulation.

✓ La deuxième section représente la légende qui représente les composantes de la première: La SB en noir, Nœud Tête de la chaîne en vert, Nœud Queue en jaune et le Nœud Mort en Rouge.

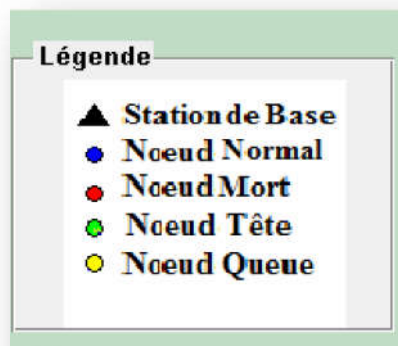


Figure IV.6: Légende.

**C. Partie de résultats de simulation :**

La partie se constitue par:

- ✓ Une boîte "Résultats" représente les résultats courants de la simulation qui sont en ordre: L'itération courante (Round), l'énergie résiduelle et les données reçues à la SB.
- ✓ Un bouton "Résumer Simulation" qui sert à résumer les résultats sous forme d'un fichier Texte.
- ✓ Un bouton "Résultats" qui sert à résumer les résultats sous forme des graphes.



Figure IV.7: Résultats de simulation.

**IV.5.2 Résultats de simulation :**

**IV.5.2.1 Les paramètre de simulation :**

Tableau IV.2: Paramètres de simulation.

Paramètres	Contexte
Protocoles	LEACH, PEGASIS-E
Surface de déploiement	100m x 100m
Nombre de capteurs	200
Position de la station de base	(50, 50)
Déploiement de nœuds	Aléatoire
Taille d'un paquet de données	500 Byte
$E_{elec}$	0.1 J
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10 PJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{mp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$E_{da}$	5 pJ/bit/sig

#### IV.5.2.2 Analyse des résultats :

Nous avons effectué plusieurs simulations (20 simulation) des algorithmes de routage PEGASIS-E et LEACH et nous avons gardé les mêmes paramètres de simulation cités dans le tableau IV.2. Les résultats des figures ci-après représentent la moyenne de ces simulations.

##### A. Nombre de rounds :

D'après la comparaison, PEGASIS-E à environ 500 rounds cependant LEACH a environ 350 rounds, et donc on conclure que la durée de vie de protocole PEGASIS-E est supérieure que la durée de vie de protocole LEACH à cause de données transmises à la SB et l'énergie résiduelle dans le réseau sont déférents entre les deux protocoles.

##### B. Données transmises à la SB :

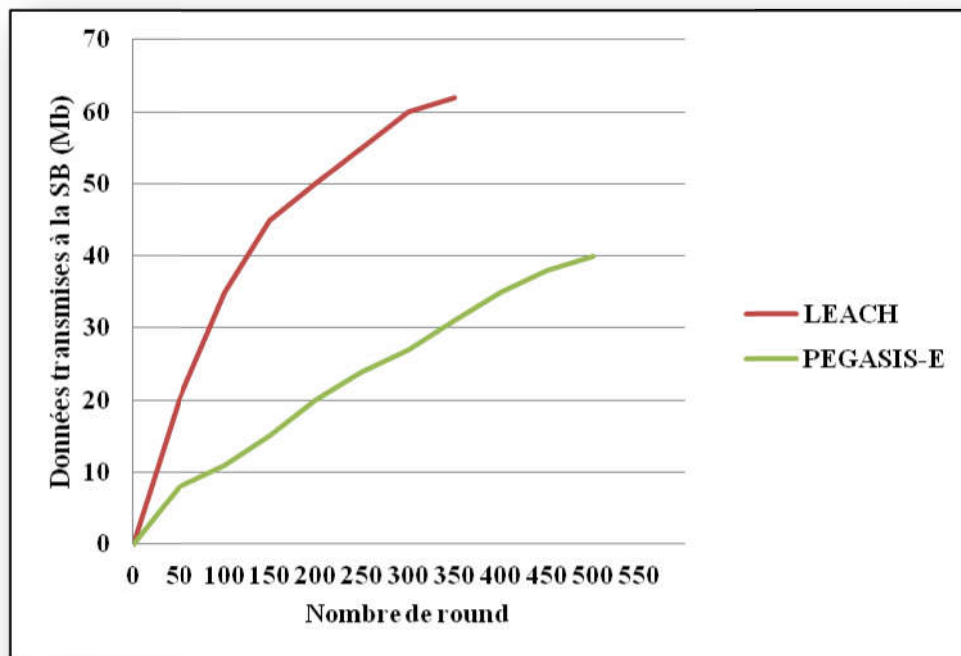


Figure IV.8: Nombre de données transmises à la SB Vs nombre de rounds.

La fig. IV.8 représente les données transmises à la SB versus le nombre de rounds. Il est clair que la quantité de données transmise à la SB par LEACH est plus grande que la quantité de données transmise par PEGASIS-E car le nombre de points de communication avec la SB durant chaque round dans LEACH, qui sont les CHs. L'envoi beaucoup à la SB n'est pas un bon résultat pour la performance d'un protocole de routage puisque tous les nœuds ont la même capacité de collection de quantités physiques tels la température, l'humidité, la vibration...etc. L'efficacité de PEGASIS-E apparaît dans la livraison d'un

nombre plus faible de messages de données à la SB grâce à un seul point communiquant la SB une fois chaque round qui représente le leader.

### C. L'énergie résiduelle :

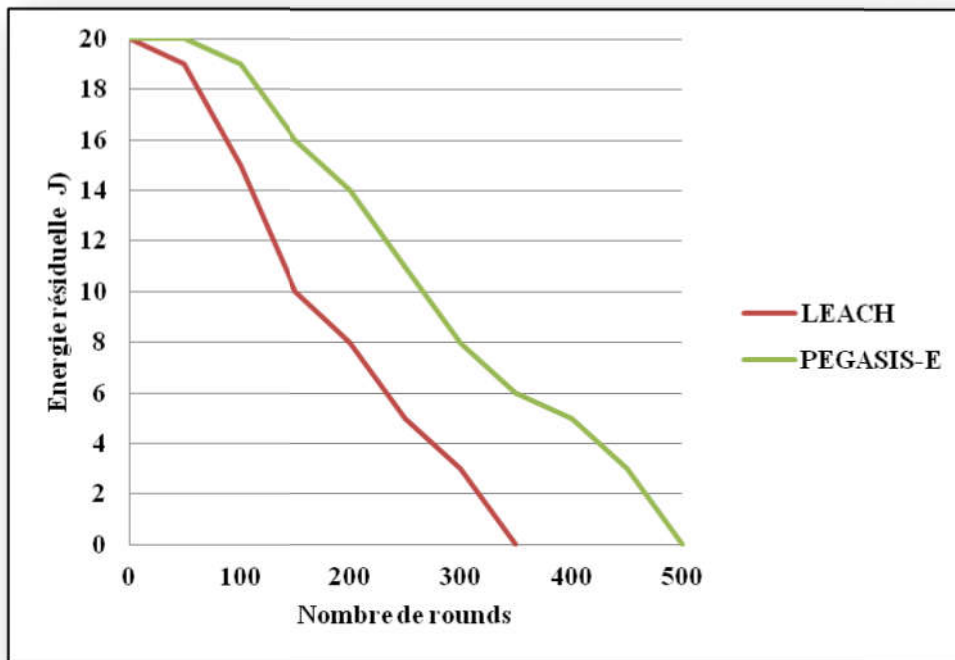


Figure IV.9: Energie résiduelle Vs nombre de rounds.

La fig. IV.9 représente l'énergie résiduelle versus le nombre de rounds pour les deux protocoles. On observe que l'énergie de LEACH se diminue rapidement, et d'une manière non régulière par rapport au PEGASIS-E. Ça revient effectivement au choix aléatoire des CHs dans LEACH qui peut être accompagnée d'une distribution irrégulière des nœuds élus. Dans le cas où les CHs sont des voisins ou situés à la frontière du réseau, les communications intra cluster effectuées par les nœuds membres éloignés de leur CHs exigent un coût très élevé des émissions qui sont menés de croisement de contrôle over Head pour la transmission de paquets de contrôle, ce qui cause un grand gaspillage de l'énergie. PEGASIS-E allège le problème en utilisant l'algorithme vorace "greedy" dans la formulation de la chaîne qui s'augmente avec le temps mais seulement en sélectionnant le nœud le plus proche et donc, les paquets de données empruntent des chemins uniques durant certains rounds, c.-à-d. la chaîne reste elle-même tant qu'un nœud n'a pas mort, et donc aucune besoin de la reconstruire puisque elle exige un coût très élevé, ce qu'il donne une conservation meilleure de l'énergie.

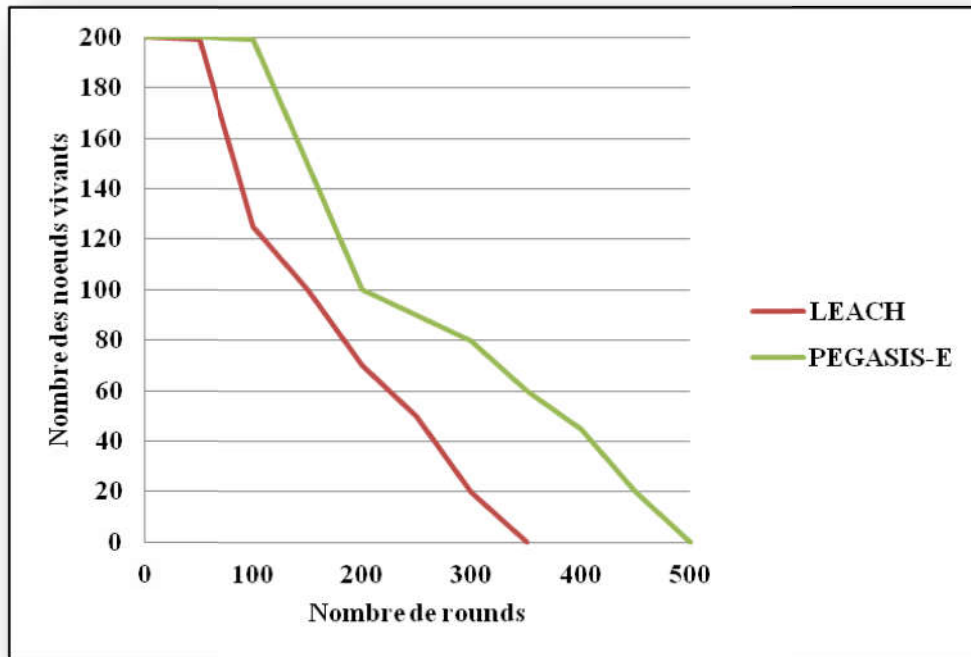
**D. Nœuds vivants :**

Figure IV.10: Nombre de nœuds vivants Vs nombre de rounds.

La fig. IV.10 illustre le nombre de nœuds survivants au cours du nombre de rounds pour les deux protocoles hiérarchiques LEACH et PEGASIS-E. Les résultats de la figure montrent clairement que PEGASIS-E a de meilleures performances que LEACH. Cela vient du fait que dans cette dernière, les CHs transmettent directement des paquets à la SB. Donc, ses énergies vont diminuer rapidement, ce qu'il cause la réélection de CHs, suivies de reconstruction des clusters et par conséquent le surcôt de consommation de l'énergie. Cependant, PEGASIS-E résout ce problème avec un seul nœud qui fait la transmission de données à la SB. En effet, l'algorithme "greedy" utilisé par PEGASIS-E applique une meilleure acquisition de l'énergie du réseau lors de la construction de la chaîne.

**E. Le premier nœud qui mort :**

C'est le protocole LEACH qui perd le premier nœud dans une itération égale à environ 50 cependant que PEGASIS-E perd son premier nœud dans un tour qui égale à environ 100, à cause de la diffusion de plusieurs paquets de contrôle pendant l'élection des CHs comparant à PEGASIS-E qui choisit un seul nœud et donc un peu nombre de paquets de contrôle est diffusé.

## **IV.6 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre l'implémentation de protocole de routage PEGASIS-E et nous avons le comparé avec le protocole LEACH en terme de l'économie de la consommation d'énergie dans les RCSFs. Nous fournissons une analyse pour montrer le bienfondé et l'efficacité des protocoles hiérarchiques en faisant une comparaison de résultats de simulation entre les deux protocoles.

Nous concluons que le protocole PEGASIS-E surpasse LEACH en termes de taux de livraison des paquets, d'efficacité énergétique, de nombre de nœuds actifs après chaque cycle et de la durée de vie du réseau. Au futur travail, le protocole PEGASIS-E peut être évalué et comparé avec d'autres protocoles.



## **Conclusion générale**

Les réseaux de capteurs constituent un axe de recherche très fertile et peuvent être appliqués dans plusieurs domaines différents. Cependant, il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans les conditions réelles. L'un des problèmes qu'on peut rencontrer dans ce genre de réseau est la consommation d'énergie. C'est pour cela que la conservation de l'énergie de ces capteurs constitue un problème de recherche ouvert.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons présenté leur principaux protocoles de routage et nous avons présenté les protocoles basés sur plusieurs approche : le clustering, la position géographique des nœuds, etc.... Parmi ces protocoles, nous nous sommes intéressés plus précisément à ceux qui traitent du problème de la consommation d'énergie. Nous pourrions ainsi utiliser des bribes de ces protocoles pour ainsi parvenir à trouver un protocole servant comme modèle à l'optimisation de l'énergie pour les RCSFs. Nous en avons conclu que la gamme de transmission et un nombre différent de nœud de capteur en tant que paramètre de système affecte la consommation d'énergie globale et le rendement du RCSF.

Nous avons implémenté et simulé le protocole de routage PEGASIS-E à l'aide de simulateur crée en langage MATLAB. Afin de valider la performance de ce protocole, nous avons le comparé avec le protocole LEACH qui est le protocole le plus populaire dans le RCSF en terme de nombre de rounds, données transmises à la SB, l'énergie résiduelle et nombre des nœuds vivants. Les résultats de la simulation prouvent que PEGASIS-E surpasse LEACH en atteignant une efficacité énergétique plus élevée prolongeant la durée de vie du réseau.

- [1] Moussouni Mohamed Akli, “Etude d’un capteur de gaze à base de TCO : cas du SnO<sub>2</sub> obtenu par APCVD”, mémoire de magister en électronique, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou Juin 2010.
- [2] Harrouz Abdelkader, “support du matière: mesure de capture”, 3<sup>ème</sup> Anne license ETT, 2017.
- [3] J.Zheng and A.Jamalipour, “Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective”, Institute of Electronics Engineers, September 2009.
- [4] Aurélia Bunel, “Les Réseaux de Capteurs Sans Fil”, Mars 2007.
- [5] Rahim Kacimi, “techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fil”, thèse de doctorat en réseaux et télécommunication, université de Toulouse, Septembre 2009.
- [6] I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam and E.Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [7] K.B.Kredo, B.P.Mohapatra: Medium access control in wireless sensor networks. Computer network 51(4), pp 961-994, March 2007.
- [8] G.Jolly, M.C.Kuscu, P.Kokate, M.Younis, “A low-energy key management protocol for wireless sensor networks,” In Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC’03), vol., 1, pp.335-340, 30June-3 July 2003.
- [9] K.Messad et L.Rahmani, “Le routage opportuniste dans les réseaux de capteurs sans fil”, mémoire de master en informatique, université Abderrahmane Mira de Bejaïa, Juillet 2016.
- [10] <http://www.bluetooth.com/pages/blouetooth-Home.aspx>, modified June 2015.
- [11] J N.B.Kothari, T.S.B.Sudarshan, S.Gurunarayanan, Chandrasekhar, “SOC deseign of a Low Power Wireless Sensor network node for Zigbee systems”, Advanced Computing and Communications, 2006. ADCOM 2006. International Conference on, vol., no., pp.462, 466, 20-23 Dec. 2006.
- [12] E.Souto, R.Gomes, D.Sadok, J.Keiner, “Sampling Energy Consumption in Wireless Sensor Networks”, In proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, vol.1, pp.4, 5-7 June 2006.
- [13] J J.Deng, Y.S.Han, W.B.Heinzelman and P.K.Varshney, “Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks”, mobile Networks and Applications, vol.10, pp.825-835, 2005.

- [14] T.Nieberg, S.Dulman, P.Havinga, L.V.Hoesel, J.Wu, “Collaborative Algorithms for Communication in Wireless Sensor Networks”, Ambient Intelligence: Impact on Embedded Systems Design, Kluwer Academic publishers, 2003.
- [15] M.E.KHANOUCHE, “Le traitement du problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil”, thèse, faculté des sciences exactes universités A.MIRA-BEJAIA, 2008.
- [16] V.Raghunathan, C.Schurgers, S.Park and M.B.Srivastava, “Energy Aware Wireless Microsensor Networks”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol.19, No.2, March 2002, pp.40-50.
- [17] W.R.Heinzelman, A.Chandrakasan and H.Balakrishnan, “Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks”, the proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 2000.
- [18] M.Younis and T.Nadeem, “Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks”, Department of Computer Science and Electrical Engineering, university of Maryland baltimore county, USA, 2004.
- [19] M.Ilyas and I.Mahgoub, “Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems”, ISBN 9780849319686. CRC PRESS LLC, USA, 2005.
- [20] H.Namgoong, D.Lee and D.Nam, “Energy Efficient Topology for Wireless Microsensor Networks”, ACM, PE-WASUN2005, October 2005.
- [21] W.Ye, J.Heidemann and D.Estrin, “Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks”, IEEE/ACM Transactions on Networking, 12(3):493-506, 2004.
- [22] M.Ali, A.Böhm and M.Jonsson, “Wireless Sensor Networks for Surveillance Applications-A Comparative Survey of MAC Protocols”, the fourth international conference on wireless and mobile communication (ICWMC 2008), pp.399-403, 2008.
- [23] J S.Ziane and A.Mellouk, “A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad hoc networks”, proceedings of the 2005 systems communications, pp.2-6, 2005.
- [24] Paolo Santi, “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, ACM Computing Surveys, Vol.37, No.2, pp.164-194, June 2005.
- [25] S.Kumar, F.Zhao, D.Shepherd, “collaborative signal and information processing in micro-sensor networks”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol.19, No.2, 2002.
- [26] Routage — Wikibédia.html.

- [27] Houari Maouchi, “Routage avec Qualité de Service dans AODV”, mémoire présenté pour obtenir le titre d’ingénieur d’état en informatique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2008-2009.
- [28] F.Jannatul and R.Salihi, “Routing: Internet Routing Protocols and Algorithms”, September 2015.
- [29] Sahraoui Belkheyr, “Etude d’un protocole de routage basé sur les colonies de fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil”, mémoire de master en informatique, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2012/2013.
- [30] Harneet Kour, “Hierarchical Routing protocols in Wireless Sensor Networks”, International Journal of Information Technology and Knowledge Management, Vol.6, No.1, pp.47-52, December 2012.
- [31] E.Yoneki and J.Bacon, “A Survey of Wireless Sensor Network Technologies : research trends and middleware’s role”, Technical Report, Computer Laboratory, UCAM-CL-TR-646 ISSN 1476-2986, Septembre 2005.
- [32] C.K.Toh, “Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless Ad Hoc networks”, IEEE Communications Magazine, Vol.39, No.6, pp.138-147, June 2001.
- [33] Jamal N. Al-Karaki and Ahmed E. Kamal, “Routing Technique in Wireless Sensor Networks : A Survey”, IEEE Wireless Communications 11(6) :6-28, January 2005.
- [34] Zitouni Rafik, “Routage à basse consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”, mémoire de magistère, 2005.
- [35] S.Boulefkhar, “Approches de minimisation d’énergie dans les réseaux de capteurs”, thèse magistère ReSyd, université de Bejaïa, 2006.
- [36] T.He, J.A.Stankovic, C.Lu and T.Abdelzaher, “SPEED : A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks”, the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003.
- [37] Yaser Yousef, “Routage pour la gestion de l’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”, thèse de doctorat en informatique, université de Haute Alsace, 2010.
- [38] Khaled Bouchakour, “Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil : protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy), Thèse de Magister en informatique, Ecole Nationale Supérieure de l’Informatique (ESI), 2012.
- [39] Eya Dhib, “Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs”, mémoire

- d'ingénieur, option : Ingénierie des réseaux, école supérieur de communication de Tunis, 2006/2007.
- [40] K.Akkaya and M.Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks”, *Journal of Ad Hoc Networks*, Elsevier, Vol.3, No.3, pp.325-349, May 2005.
- [41] R.Bellman, “On a Routing Problem”, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.16, No.1, pp.87-90, 1958.
- [42] M.Abolhasan, T.Wysocki and E.Dutkiewicz, “A review of routing protocols for mobile ad hoc networks”, *Journal of Ad Hoc Networks*, Elsevier, Vol.2, No.1, pp.1-22, January 2004.
- [43] Z.Qiang and Z.Hongbo, “An optimized AODV protocol in mobile ad hoc network”, 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp.1-4, October 2008.
- [44] I.D.Chakeres and E.M.Belding-Royer, “AODV Routing Protocol Implementation Design”, 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, March 2004.
- [45] M.Macedo, A.Grilo and M.Nunes, “Distributed Latency-Energy Minimization and interference avoidance in TDMA Wireless Sensor Networks”, *Computer Networks : The International Journal of computer and Telecommunications Networking*, pp.569-582, 2009.
- [46] M.Nunes, A.Grilo and M.Macedo, “Interference-Free TDMA Slot Allocation in Wireless Sensor Networks”, the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007), Clontarf Castle, Dublin, Ireland, October 2007.
- [47] Yacine Challal, plateforme pédagogique [en ligne]. 2017. Disponible sur [http://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module\\_RCSF\\_60.html](http://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_60.html), Décembre 2016.
- [48] N. Vibha, K. S. Ajay, “PEGASIS-E: Power Efficient Gathering in Sensor Information System Extended”, *Global Journal of Computer Science and Technology Network, Web & Security*, vol. 13, no. 15, pp. 1-5, 2013.
- [49] MathWorks, “Principales fonctionnalités MATLAB”, 2011.