

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement  
Supérieure et de la Recherche  
Scientifique**



**Université 20 Août 1955 - Skikda**

**Faculté des Sciences / Département d'Informatique**

## **Mémoire**

**Pour l'obtention du diplôme de master académique en informatique**

**Option : génie logiciel avancé et applications**

**Intitulé :**

**Etude et réalisation d'un protocole de routage des  
réseaux de capteurs sans fil hétérogènes basé sur  
DEEC.**

**Présenté par :**

**Mecibah Nedjla**

**Tanfour Khaoula**

**Encadré par :**

**Dr. Nebti salima**

**Co-dirigé par :**

**Pr. Redjimi Mohammed**

**2021/2022**

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord et avant tout, nous remercions vivement le bon Dieu, le tout puissant qui nous a guidé vers le droit chemin, de nous avoir permis d'emprunter le chemin de la recherche et de nous avoir donné suffisamment de courage et de patience pour accomplir ce travail.*

*Nos reconnaissances et nos remerciements sincères se tournent en premier lieu vers notre encadreur, le professeur Mohammed Redjimi et Nebti salima, qui nous a permis de mener à bien nos travaux. Ce mémoire doit beaucoup à ses précieux conseils, à sa rigueur, à son calme et à sa disponibilité.*

*Nos remerciements à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.*

*Nos remerciements également à nos parents, nos sœurs, nos frères et nos amis*

*Enfin nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé à réaliser ce mémoire.*

## *Dédicaces*

*Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à  
ALLAH le tout puissant.*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et  
de remerciement :*

*A mes chers parents*

*Ma maman : qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour,  
son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils,  
pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à  
travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes  
sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon papa : qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues  
années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans  
la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit  
Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien  
permanent venu de toi.*

*A mes chères frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des  
exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*A mes chers ami(e)s et cousin(e)s.*

*Et enfin à tous ceux et celles qui sont chers.*

*Mecibah Nedjla*

## *Dédicaces*

*Ce travail, je le dois à mes très chers **parents** qui m'ont fourni au quotidien un soutien et une confiance sans faille et de ce fait, je ne saurais exprimer ma gratitude seulement par des mots. Que dieu vous protège et vous garde pour nous.*

*Je dédie ce travail à mes sœurs : **MANEL, Meriem** et mes chères frères **Mehdi, wail**.*

*C'est grâce à eux que je garde mon espoir et mon sourire, tout simplement ils font mon bonheur.*

*A mon fiancé **Fouad** qui m'a donné l'espoir et le courage pour continuer ce travail et qui ont fait leur impossible pour m'aider réaliser ce modeste projet.*

*A mes plus chères amies plutôt mes sœurs : **chauma, Soumaya, imen, rayen**.*

*A mes amies amie d'études, et ma binôme **nedjla**.*

*A tous les amies que j'ai eu la chance d'avoir.*

*A toute ma grande famille: mes oncles, mes tantes et mes cousins.*

*Tanfouir Khaoula*

# Table de matière

<b>Introduction générale.....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre1 : état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil</b>	
<b>1. Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>2. Présentation des RCSFS .....</b>	<b>16</b>
2.1. Les réseaux Ad hoc .....	16
2.2. Définition d'un réseau de capteur sans fil .....	18
2.3. Définition d'un capteur.....	18
2.3.1. Architecture matérielle .....	18
2.3.2. Architecture Logicielle .....	19
2.4. Types des réseaux de capteurs sans fil .....	19
2.5. Caractéristiques des capteurs sans fil.....	20
<b>3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.....</b>	<b>21</b>
3.1. Topologies des réseaux de capteurs .....	21
3.1.1. Topologie en étoile .....	21
3.1.2. La topologie maillée .....	22
3.1.3 Topologie hybride .....	22
<b>4. Les contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs.....</b>	<b>23</b>
4.1 Les contraintes matérielles .....	23
4.2 L'échelle .....	23
4.3 La topologie de réseau.....	24
4.4 Les médias de transmission .....	24
<b>5. La pile protocolaire .....</b>	<b>24</b>
5.1.1 La couche physique .....	25
5.1.2 La couche liaison de données .....	25
5.1.3 La couche de réseau.....	26
5.1.4 La couche transport .....	26
5.1.5. La couche application .....	26

5.1.6. Plans de gestion de l'énergie.....	26
5.1.7. Plans de gestion de la mobilité.....	27
5.1.8. Plans de gestion des tâches .....	27
5.2 Technologie et standard de communication .....	27
5.2.1 La norme IEEE 802.15.4 .....	27
5.2.2 ZigBee.....	29
5.3 Systèmes d'exploitation pour capteurs.....	30
5.3.1 TinyOS.....	30
5.3.2 Contiki.....	30
<b>6. Domaines d'application.....</b>	<b>30</b>
6.1 Applications militaires.....	31
6.2 Applications médicales et aide à la personne .....	31
6.3 Applications environnementales .....	32
6.4 Applications industrielles .....	32
6.5 Applications domestiques .....	32
6.6 Applications commerciales.....	32
6.7 Applications à la sécurité.....	33
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>33</b>
<b>Chapitre 02: les protocoles et les techniques d'optimisation</b>	
<b>1. Introduction.....</b>	<b>35</b>
<b>2. Principes des Techniques de routages .....</b>	<b>35</b>
<b>3. Principaux protocoles de routage des RCSFs.....</b>	<b>35</b>
3.1 Les protocoles de routage à plat.....	36
3.1.1. SPIN (Sensor Protocols Information via Negotiation) .....	36
3.1.2 DD (Directed Diffusion).....	37
3.2. Protocoles de routage hiérarchique .....	38
3.2.1. LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) .....	39
3.2.2 TEEN Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) 40	
3.3 Les Protocoles géographiques (basés sur la location).....	41
3.3.1 MECN (Minimum Energy Communication Network) .....	41
3.3.2 Le protocole de routage GAF (Geographic Adaptive Fidelity) .....	42

<b>4. Critères de performance des protocoles de routage dans les RCSF.....</b>	<b>41</b>
<b>5. La contrainte d'énergie pour le routage .....</b>	<b>43</b>
5.1 Les sources de consommation d'énergie .....	44
5.2 Techniques de la conservation d'énergie dans les RCSF .....	44
<b>6. Méthodes de conservation d'énergie dans les RCSF .....</b>	<b>45</b>
6.1. Techniques du Duty-cycling .....	45
6.1.1. Protocoles Sleep/Wakeup .....	46
6.1.2. Protocoles du niveau MAC .....	46
6.1.2.1. Protocoles MAC reposant sur TDMA .....	46
6.1.2.2. Protocoles MAC hybrides .....	46
6.2. Approches orientées données .....	45
6.2.1. Techniques de réduction de données .....	47
6.2.2. Acquisition de données efficace en énergie .....	47
6.3. La mobilité .....	47
<b>7. Consommation d'énergie dans les RCSF .....</b>	<b>47</b>
7.1 Modèle de consommation d'énergie .....	47
<b>8. Conclusion .....</b>	<b>48</b>
<b>Chapitre 03 : proposition d'un protocole basé sur DEEC</b>	
<b>1. Introduction .....</b>	<b>50</b>
<b>Travaux Connexes : .....</b>	<b>50</b>
<b>2. Le protocole : DEEC .....</b>	<b>52</b>
<b>3. Le protocole DDEEC .....</b>	<b>54</b>
<b>4. Le modèle énergétique .....</b>	<b>55</b>
<b>5. Optimisation Par Essaims de Particule .....</b>	<b>55</b>
<b>6. La sélection de CHs basée sur PSO binaire .....</b>	<b>57</b>
6.1 Représentation des particules .....	58
6.2 La fonction objective .....	59
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>59</b>
<b>Chapitre04: simulation et résultats expérimentaux</b>	
<b>1. Introduction .....</b>	<b>59</b>
• <b>Mise en œuvre .....</b>	<b>59</b>

<b>2. Présentation du logiciel MATLAB .....</b>	<b>59</b>
<b>3. Résultats et discussion.....</b>	<b>62</b>
<b>• Paramètres initiaux.....</b>	<b>63</b>
<b>4. Conclusion .....</b>	<b>67</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>69</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>70</b>

# Liste des figures

## **Chapitre 01: état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil**

Figure 1.1: réseaux ad hoc [3] .....	18
Figure 1.2 : Architecture d'un capteur sans fil [9]. .....	19
Figure 1.3: Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [13]. .....	21
Figure 1.4: Topologie de réseau en étoile [14]. .....	22
Figure 1.5: Topologie de réseau maillé [9]. .....	22
Figure 1.6: Topologie hybride [9]. .....	23
Figure 1.7: Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil [18]. .....	25
Figure 1.8: Les domaines d'applications dans les RCSFs [27]. .....	31

## **Chapitre 02: les protocoles et les techniques d'optimisation**

Figure 2.1: Les principaux protocoles de routage [33] .....	36
Figure 2.2: Protocole de routage SPIN .....	37
Figure 2.3: Protocole de routage DD .....	38
Figure 2.4: Architecture de communication du protocole LEACH .....	40
Figure 2.5 : Les méthodes de conservation d'énergie [41]. .....	45
Figure 2.6: Modèle de consommation d'énergie .....	48

## **Chapitre 04: simulation et résultats expérimentaux**

Figure 4.1 : Courbes comparatifs (DEEC, DDEEC & BPSO-DEEC) .....	66
--	----

# Liste des tableaux

Table 4 1: Paramètres du réseau .....	63
Table 4 2: Paramètres du BPSO .....	63
Table 4. 3: les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-DEEC de la figure 4.1 .....	66
Table 4. 4: les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-DEEC de la figure 4.1 .....	66
Table 4. 5: les données numériques correspondantes aux courbes DDEEC de la figure 4.1 .....	67

# Abstract

In a Wireless Sensor Network (WSN), a large number of sensors with limited power resources (batteries) are generally deployed in highly hazardous or inaccessible environments such as ocean monitoring, volcanic activity monitoring, industrial surveillance, control of chemically polluted environments, etc. Sensors are used to collect data measuring environmental phenomena (such as temperature, humidity, pressure, radioactivity...etc.). The main objective of the WSNs is the prevention of natural and human disasters, the prevention of industrial damages and the study of natural phenomena, etc. The main challenges of WSNs are energy efficiency and self-organization due to their limited energy resources.

In this thesis, to contribute to the improvement of the use of energy resources, we have studied two routing protocols for WSNs: DEEC (Distributed Energy-Efficient Clustering) and DDEEC (Developed Distributed Energy-Efficient Clustering) and we have proposed at the end of this thesis the BPSO-DEEC protocol. This protocol uses Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) in the configuration step of the DEEC protocol to find the best cluster heads minimizing the energy consumption of the sensor nodes, so the objective is the extension of the lifetime of the sensors and thus of the network as a whole through an optimal use of energy resources. The results found using simulations under MATLAB are satisfactory compared to the protocols: DEEC and DDEEC.

**Key words** : Wireless sensor networks, energy optimization ,routing protocols, DEEC, DDEEC, BPSO-DEEC.

# Résumé

Dans un réseau de capteurs sans fil (RCSF), un grand nombre de capteurs avec des ressources d'énergie limitées (batteries) sont généralement déployés dans des environnements très dangereux ou inaccessibles tels que la surveillance des océans, contrôle de l'activité volcanique, la surveillance industrielle, contrôle des milieux chimiquement pollués...etc. Les capteurs sont utilisés pour collecter des données mesurant les phénomènes environnementaux (comme la température, l'humidité, la pression, la radioactivité, le CO<sub>2</sub>... etc.). L'objectif principal des RCSFs est la prévention des catastrophes naturelles et humaines, la prévention des dommages industriels et l'étude des phénomènes naturels ...etc. Les principaux défis des RCSFs sont l'efficacité énergétique et l'auto-organisation due à leurs ressources d'énergie limitées.

Dans ce mémoire, pour contribuer à l'amélioration de l'utilisation des ressources énergétiques, nous avons étudié deux protocoles de routage des RCSFs : DEEC (Distributed Energy- Efficient Clustering) et DDEEC (Developed Distributed Energy-. Efficient Clustering) et nous avons proposé à la fin de ce mémoire le protocole BPSO-DEEC. Ce protocole utilise l'optimisation par essaim de particules binaire (BPSO) dans l'étape de configuration du protocole DEEC pour trouver les meilleurs clusters chefs minimisant la consommation d'énergie des nœuds capteurs, l'objectif est donc l'extension de la durée de vie des capteurs et ainsi du réseau dans son ensemble à travers une utilisation optimale des ressources d'énergie. Les résultats trouvés à l'aide des simulations sous MATLAB sont satisfaisant par comparaison aux protocoles : DEEC et DDEEC.

**Mot clés :** Réseaux de capteurs sans fil, optimisation de l'énergie, Protocole de routage, DEEC, DDEEC, BPSO-DEEC.

# Introduction générale

Dans le but de faciliter la vie et de fournir un maximum de confort aux personnes tout en essayant d'éliminer les difficultés de la vie courante plusieurs technologies sont apparues pour garantir ces besoins, l'une de ces technologies concerne les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) qui constituent un des domaines les plus actifs pour la recherche, car ils offrent des solutions économiquement efficaces.

Un réseau de capteurs sans fil est composé d'un ensemble de capteurs autonomes à faible coût, interconnectés par un réseau de communications radio, capables d'effectuer des mesures sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée. Ces derniers ont été utilisés initialement à des fins militaires tels que la surveillance de terrains de combat. Puis, ces réseaux de capteurs ont été appliqués dans plusieurs autres domaines tels que le domaine civil, industriel, médical, ... Aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil sont devenus une technologie clé pour les différents types d'environnements intelligents. De nos jours, ils nous aident par exemple à avoir un bon système de sécurité à la maison (smart home).

Les RCSF sont été considéré comme des Réseaux MANET (Mobile Ad hoc Network), car ils partagent avec les MANETs quelques propriétés comme l'absence d'infrastructure et les communications sans fil. Cependant, c'est leurs domaines applications et leurs problématiques qui les différencient. En effet, les RCSFs ont comme défis les contraintes de la consommation énergétiques, la couverture de toute de la zone de détection et le maintien des champs de communication des nœuds en connectivité, tandis que les MANET ont comme défis les problèmes liés à la sécurité, la qualité de service, la latence...etc [1].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'optimisation de la consommation énergétique dans les protocoles de routages hétérogènes dédiés aux RCSFs. Plus particulièrement nous nous intéressons à l'étude et l'amélioration du protocole DEEC en termes de la conservation d'énergie et l'extension de la durée de vie du réseau.

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres comme suit :

**Chapitre1** : Dans le premier chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et leurs concepts.

**Chapitre2** : présente les classifications des protocoles de routage des RCSFs.

**Chapitre3** : est consacré à l'exposition de notre travail, notamment : la présentation du protocole hétérogène "DEEC", et sa variante DDEEC, la description de la méthode d'optimisation par essaim de particules binaire BPSO ainsi que son utilisation dans l'étape de configuration du protocole hétérogène DEEC.

Nous abordons à la fin dans **le chapitre 4** les résultats obtenus de la simulation sous MATLAB avec discussion.

Et nous terminons ce mémoire avec une conclusion générale et quelques perspectives.

# **Chapitre1**

## **Etat de l'art sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil(RCSF)**

## **1. Introduction**

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau constitué d'un grand nombre de capteurs distribués dans une zone d'installation appelée 'zone d'intérêt' ou 'champ de captage'. Ces capteurs sont capables de collecter, de traiter et de transmettre des données d'une façon autonome. Les positions de nœuds peuvent être aléatoires.

Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil sont très nombreux tels que les maisons intelligentes, la surveillance des malades, la détection d'intrusions dans les champs militaires, la localisation de combattants, la transportation, le contrôle des armes, etc. sur un champ de bataille, sous l'eau, dans l'espace, dans le sol....) [2].

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est constitué d'un ensemble de capteurs, variant de quelques dizaines jusqu'à milliers. Ces nœuds sont capables de surveiller un environnement et de réagir par envoi de l'information à un ou plusieurs stations de base [3].

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil, nous définissons les réseaux Ad hoc et la catégorie des RCSFs, leurs architectures, leurs modes de communication, ainsi que leurs types et leurs caractéristiques.

## **2. Présentation des RCSFS**

### **2.1. Les réseaux Ad hoc**

Un réseau sans fil ad hoc [4] ou WANET (Wireless Ad Hoc Network) ou MANET (Mobile Ad Hoc Network) est une catégorie des réseaux sans fil qui ne s'appuient pas sur une infrastructure, tel que les routeurs ou les points d'accès, le serveur, les switches ou Hub...Dans un réseau ad hoc, chaque nœud peut devenir un routeur.

La normalisation des réseaux Ad-hoc a été réalisée par l'IETF (Internet Engineering Task Force) dans le groupe de travail MANET [5].

Les réseaux ad hoc possèdent les propriétés suivantes [4, 6] :

- Topologie dynamique due au déplacement des nœuds dans les réseaux mobiles.
- Bande passante limitée due à la communication sans fil ayant une bande passante limitée.
- Ressources énergétiques limitées car les nœuds sont alimentés par des sources d'énergie autonomes (batteries).
- Sécurité limitée: les réseaux ad hoc souffrent de la faible sécurité vis-à-vis des risques de piratage, contrairement aux réseaux filaires qui disposent d'une sécurité plus forte.
- Qualité de Service (QoS) : Dans ces réseaux ad hoc la qualité de service se dégrade d'une part à cause du canal radio (interférences et taux d'erreur élevés, perte des routes) et en d'autre part, des fonctions employées pour la gestion du réseau.
- Nœuds cachés: Ce phénomène est particulier aux communications sans fil. Par exemple, les nœuds A et C assument que le médium est libre, et lorsqu'ils transmettent des informations au nœuds B, il y aura une collision au niveau du nœud B.

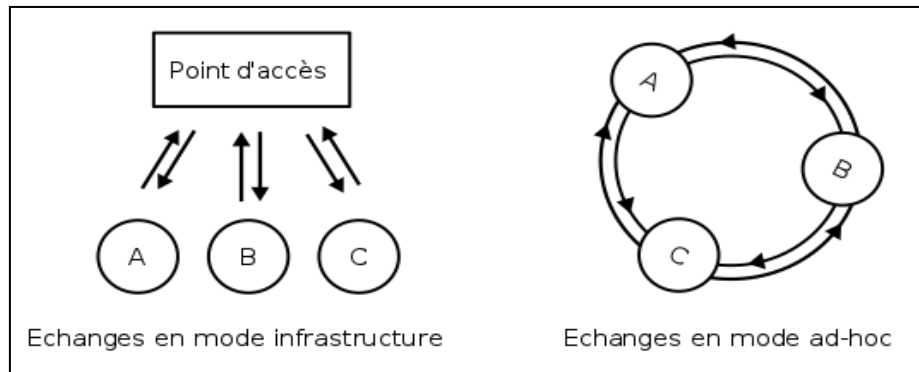


Figure 1.1: réseaux ad hoc [3]

## 2.2. Définition d'un réseau de capteur sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau qui connecte un nombre d'hôtes (ou nœuds) par des signaux radios. Les réseaux sans fil est une extension des réseaux câblés et peuvent également être intégrés avec les réseaux câblés [7].

## 2.3. Définition d'un capteur

C'est un dispositif qui sert à détecter, sous forme d'un signal électrique, un phénomène physique tels que changement de température, l'humidité, la vitesse, la pression, la concentration de CO<sub>2</sub>... Les capteurs peuvent communiquer avec autres capteurs et de détecter les événements qui se trouvent dans leur rayon de perception (ou leur champ de captage). Les Communications sans-fil entre nœuds sont généralement à travers des signaux de la radio [8].

Ci-dessous, nous présentons les deux parties qui composent un capteur :

### 2.3.1. Architecture matérielle

Un capteur est composé de 3 unités [9] :

**L'unité d'acquisition** : cette unité est composée d'un capteur et d'un convertisseur Analogique/Numérique, le capteur obtient les mesures physiques suivant les paramètres environnementaux et le convertisseur.

Analogique/Numérique qui sert à convertir l'information relevée en numérique pour la transmettre à l'unité de traitement.

**L'unité de traitement** : Cette unité est composée d'un processeur et d'un système d'exploitation. Elle reçoit les informations de l'unité d'acquisition et les transmet à l'unité de communication.

**L'unité de communication** : est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.

Ces trois unités sont alimentées par une batterie comme illustré dans la figure ci-dessous :

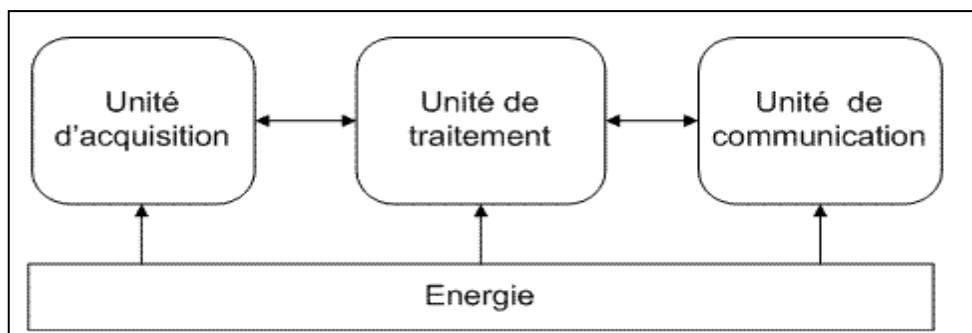


Figure 1. 2 : Architecture d'un capteur sans fil [9]

### 2.3.2. Architecture Logicielle

La contrainte énergétique des capteurs exige l'utilisation de système d'exploitation légers tels que Tinos ou Contiki. Cependant, TinyOS [10] reste le plus utilisé dans les simulations des RCSFs. C'est un système d'exploitation libre largement utilisé dans les Simulations des algorithmes et protocoles des réseaux sans fils.

### 2.4. Types des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSFs peuvent être distingués selon deux points clefs [11]:

**a) Le modèle dynamique de réseau**

- Soit les nœuds capteurs sont mobiles déplaçant dans un environnement statique. Tels que la robotique, dans ce type de réseaux, les nœuds jouent à la fois le rôle de capteur et d'actionneur.
- Soit les nœuds capteurs sont fixes et qui ne servent qu'à surveiller l'environnement.

**b) Le modèle de délivrance de données**

Il existe quatre mode de délivrance des données à la station de base [11]:

- les capteurs transmettent périodiquement les informations recueillies d'une façon continue.
- Les capteurs transmettent les informations à la détection d'un évènement
- Les capteurs transmettent les informations à la demande d'un utilisateur par une requête.
- Délivrance de données hybride où on trouve les différentes délivrances citées auparavant.

**2.5 Caractéristiques des capteurs sans fil**

Un nœud capteur est caractérisé par [12]:

Sa petite taille.

L'autonomie : par sa propre source d'énergie et son fonctionnement.

La vitesse de calcul et de transmission.

Durée de vie de la batterie : elle doit être la plus longue que possible.

Le faible cout de production.

### 3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Comme mentionné précédemment, un réseau de capteurs sans fil est constitué d'un nombre de nœuds organisés en champs « sensor Fields. Les données collectées par ces nœuds capteurs seront acheminées vers une ou plusieurs stations de base ou nœud puits (sinken anglais). Le sink est un point de collecte des données capturées par les nœuds. Il peut transmettre les données collectées à un utilisateur via un réseau de communication, tel que l'Internet ou un satellite. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau [13].

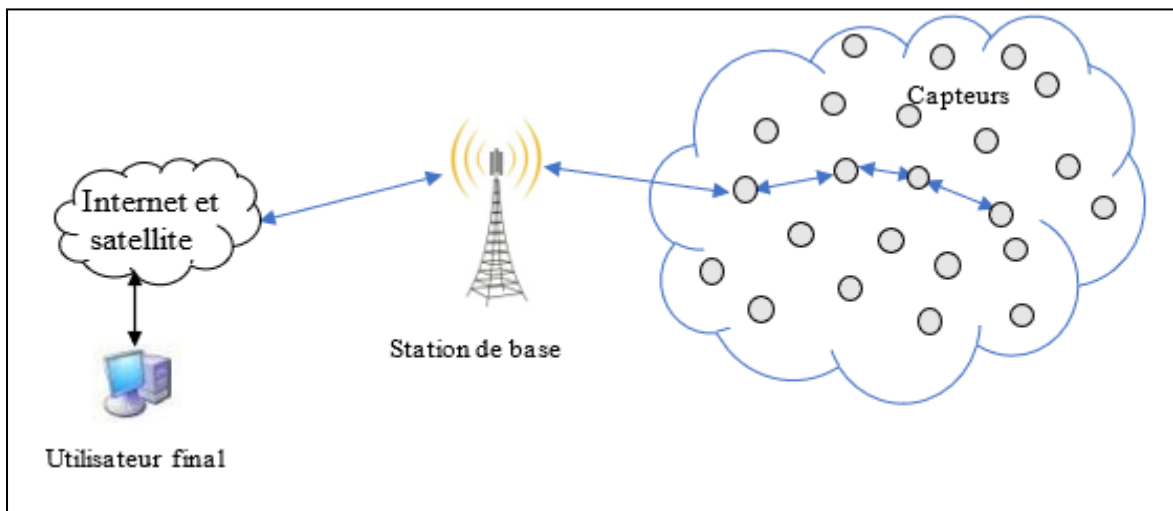


Figure 1. 3: Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [13]

#### 3.1. Topologies des réseaux de capteurs

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux de capteurs sans fil telles que :

##### 3.1.1. Topologie en étoile

Tous les nœuds envoient et reçoivent en un seul saut les données avec la station de base. Cette topologie est simple mais exige une distance courte entre les nœuds et la station et la station de base, elle n'est pas donc applicable au réseaux de grandes tailles [14].

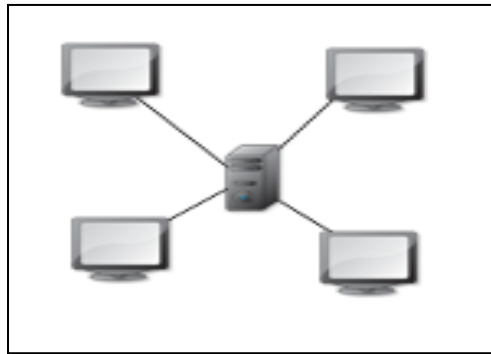


Figure 1. 4: Topologie de réseau en étoile [14]

### 3.1.2. La topologie maillée

Les réseaux maillés consistent à interconnecter tous les nœuds ensemble. Leur domaine d'application est très souvent l'industrie pour faire communiquer les équipements (M2M) entre eux, car ils sont très peu sujets aux pannes et extensibles [9].

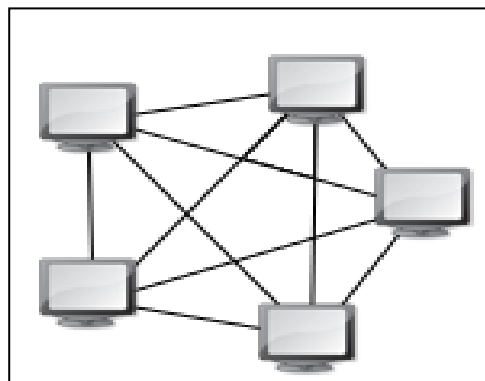


Figure 1. 5: Topologie de réseau maillé [9]

### 3.1.3 Topologie hybride

La topologie hybride est une combinaison des deux topologies ci-dessus. Les stations de base peuvent être en étoile et les nœuds autour d'elles sont en maille. Ce type est utilisé pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs à moyenne taille.

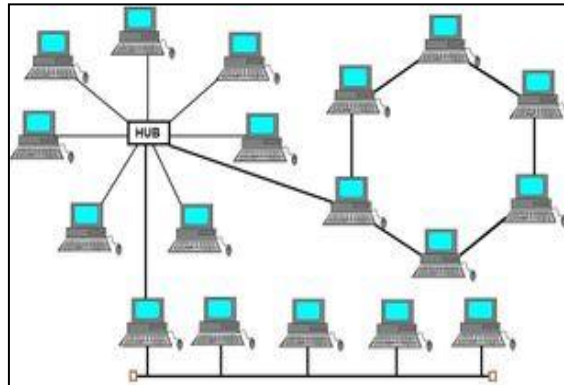


Figure 1. 6: Topologie hybride [9]

#### 4. Les contraintes dans la conception d'un réseau de capteurs

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF [15].

##### 4.1. Les contraintes matérielles

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont que la consommation d'énergie 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 [15].

##### 4.2. L'échelle

Le nombre de nœuds déployés pour un projet peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le puits "sink " soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues [15].

### 4.3. La topologie de réseau

La topologie du réseau doit être maintenue ou reconfigurée en cas de besoin dans les trois phases d'installation d'un réseau de capteur: le déploiement, le Post-déploiement (les capteurs peuvent bouger ou tomber en panne,...), le Redéploiement de nœuds additionnels [15].

### 4.4. Les médias de transmission

Les moyens de communication dans les réseaux de capteurs sans fil sont le plus souvent l'infrarouge (qui est license-free, robuste aux interférences, et peu onéreux), le bluetooth et les communications radio ZigBee [16].

**La consommation d'énergie :** Un nœud capteur est limité en énergie et le remplacement de la batterie est souvent difficile ou impossible. Dans les réseaux de capteurs (multi-sauts) ; la transmission des paquets de données se fait d'un nœud à un autre jusqu'à sa délivrance à la station de base. Ainsi, un dysfonctionnement de quelques nœuds provoque un changement total de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Ces opérations sont très gourmandes en énergie, c'est pourquoi les recherches actuelles se focalisent sur les moyens et techniques de la réduction de la consommation énergétique [15], [16].

### 5. La pile protocolaire

Pour assurer les différentes fonctionnalités d'un réseau de capteurs sans fil, l'architecture en couches ou la pile protocolaire [17] est utilisée par la station de base aussi bien que par tous les autres nœuds du réseau comme illustrée par la Figure1.7. Le modèle protocolaire comprend 5 couches (une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique) qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, ainsi

que 3 niveaux (plans) qui sont : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches [18].

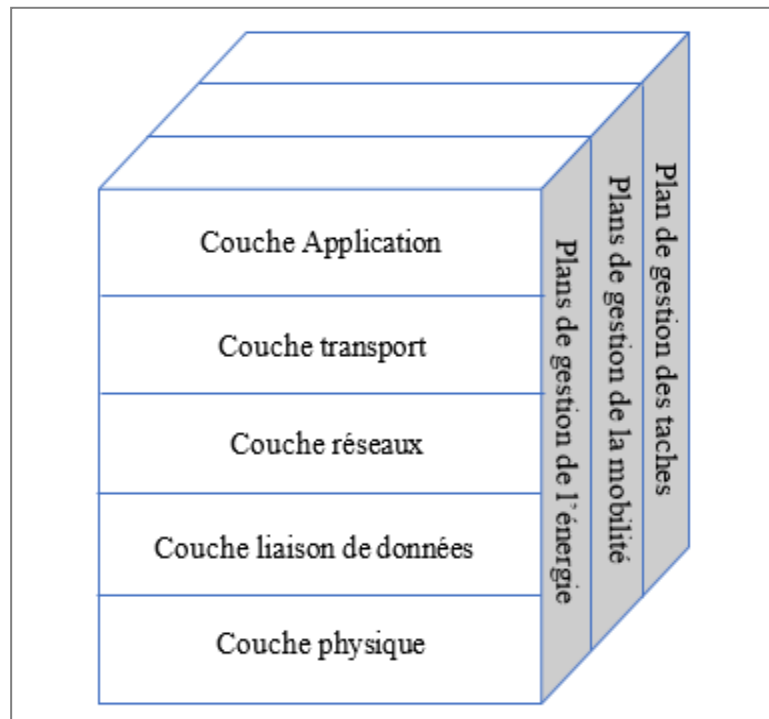


Figure 1. 7: Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil [18].

### 5.1.1. La couche physique

Cette couche est responsable de toute émission et toute réception de données, de la sélection des fréquences et de la détection du signal.

### 5.1.2. La couche liaison de données

La couche liaison garantit une connexion fiable (point à point ou point-à-multipoints), elle définit, pour chaque nœud, son temps d'accès au canal de communication, elle est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et du verrouillage des trames de données et du contrôle des erreurs [18].

**5.1.3. La couche de réseau**

La couche réseau s'occupe de routage des données (trouver un chemin pour une transmission fiable des données) collectées, des nœuds vers la station de base en minimisant la consommation d'énergie des capteurs.

**5.1.4. La couche transport**

La couche transport est chargée du contrôle de flux de données et de leur transport entre les différentes couches. Pour ce faire, elle divise les données reçus d'un nœud source (issu de la couche application) en segments avant leur acheminement dans le réseau et elle réordonne et réassemble les données issues de la couche réseau avant d'être envoyées via la couche application au récepteur. Cette couche gère aussi les files d'attente des paquets lors de leurs transmissions à la couche réseau [19].

**5.1.5. La couche application**

La couche application est la couche la plus proche à l'utilisateur. Elle constitue l'interfaçage avec l'utilisateur. Elle gère par des logiciels utilisateurs le rôle de chaque nœud capteur. Elle gère aussi la compression et l'agrégation des données collectées avant leur transmission à la couche transport. Le rôle de chacun des différents plans de gestion est décrit ci-dessous [19] :

**5.1.6. Plans de gestion de l'énergie**

Cette couche contrôle l'utilisation des ressources énergétiques (les batteries). Par exemple, mettre le module radio du nœud récepteur en veille après la réception d'un message, pour économiser de l'énergie. En plus, si le niveau d'énergie d'un certain nœud est devenu en dessous d'un seuil prédéfini, ce nœud diffuse une alerte à ses voisins afin de les informer qu'il ne puisse pas participer au routage, afin de renforcer la tolérance aux pannes.

### **5.1.7. Plans de gestion de la mobilité**

Cette couche est responsable de la détection et d'enregistrement des positions des nœuds capteurs dans la zone d'intérêt pour mieux coordonner et gérer l'utilisation de leur ressource d'énergie.

### **5.1.8. Plans de gestion des tâches**

Cette couche est responsable de la coordination, l'équilibrage de charge et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'optimiser les performances du réseau en termes de la conservation d'énergie, et la prolongation de sa durée de vie.

## **5.2. Technologie et standard de communication**

Les réseaux sans fil Ad hoc classiques ne sont pas appropriés aux applications des RCSFs à cause de leur coût élevé et la consommation énergie non contrôlée. C'est pour cette raison que les normes IEEE 802.15.4 et ZigBee ont été mises en œuvre en tant que un standard adapté aux systèmes sans fil. Ce standard est caractérisé par un coût faible et une meilleure gestion de la consommation énergétique [20].

### **5.2.1. La norme IEEE 802.15.4**

La norme IEEE 802.15.4 [9] définit les fonctions des sous-couches PHY et MAC dans le contexte d'une connexion sans fil entre capteurs fixes ou mobiles de faibles capacités (débit faible et batterie limitée). Ces réseaux appelés WPAN (Wireless Personal Area Network) sont destinés à des communications sans fil de courtes distances (de dizaines à centaines de mètres). Ils sont caractérisés par leur coût d'infrastructure faible par rapport aux réseaux locaux sans fil. La norme IEEE 802.15.4 définit deux modes de communication : le mode sans balise et le mode avec balise [20], [21].

**Le mode sans balise (non-beacon) :** dans ce mode le coordinateur reste par défaut dans l'état d'attente de données. Le capteur qui veut transmettre regarde si le canal est libre. Si c'est le cas, alors il transmet sinon il attend une période aléatoire (définie dans le protocole IEEE 802.15.4). Lorsque le coordinateur a des données à transmettre à un capteur, il attend que le capteur entre en contact et lui demande les données. Le coordinateur envoie alors un accusé de réception de la requête. Si des données sont en suspens, le coordinateur transmet les données en utilisant le même principe (CSMA/CA). S'il n'y a pas de données en suspens, le coordinateur envoie une trame de données vide (longueur 0). Le capteur accuse réception des données. Le mode non-beacon est généralement utilisé pour les capteurs (type interrupteur) qui dorment la majorité du temps (99 %). Quand un événement se passe, les capteurs se réveillent instantanément et envoient une trame d'alerte [21].

Cette solution a pour avantage d'optimiser l'autonomie des batteries des capteurs et d'utiliser le canal uniquement lorsqu'il est nécessaire [21].

**Le mode avec balise beacon :** L'objectif d'un réseau fonctionnant avec l'envoi périodique d'une balise est de synchroniser les nœuds capteurs avec le coordinateur. Dans la norme IEEE 802.15.4, tous les nœuds (y compris le coordinateur) fonctionnent de façon indépendante. Pour se communiquer sur le réseau, ils doivent savoir à quel moment se réveiller. Pour cela il est nécessaire qu'ils se synchronisent par rapport au réveil du coordinateur (ou d'un routeur) comme il est responsable du routage des données à travers le réseau.

Lors de la réception d'une balise, tous les nœuds sont informés de la durée de la super frame (période d'activité du coordinateur) et à quel moment ils peuvent transmettre des données. Ils recevront aussi une indication à partir de quel

moment le coordinateur entre en hibernation et pour quelle durée. Les dispositifs savent alors quand ils peuvent entrer en hibernation ou transmettre. L'envoi régulier d'un beacon permet de resynchroniser l'ensemble des nœuds et d'informer des changements dans la super frame.

De plus, le beacon d'un coordinateur ou d'un routeur est transmis sans utiliser CSMA/CA. En effet, tous les nœuds doivent se réveiller quelques instants avant l'émission du beacon et sont mis en attente de cette trame pour se synchroniser. Le dispositif écoute la balise du réseau, se resynchronise sur la balise et transmet des trames de données en utilisant les slots de la super frame [21].

### **5.2.2. ZigBee**

Cette technologie a pour but la communication à courtes distances, telle que le propose déjà la technologie Bluetooth [22].

La norme ZigBee [ZigBee] décrit les couches hautes d'un réseau sans fil personnel à basse consommation énergétique, en s'appuyant sur la couche physique et la sous couche MAC de IEEE 802.15.4 [IEEE 802.15-4 v2003] pour les couches basses.

La couche réseau de ZigBee définit trois types d'entités : les feuilles, les routeurs et le coordinateur [20].

Les feuilles sont des nœuds ayant des fonctionnalités limitées, et sont généralement équipés de capteurs ou d'actionneurs.

Les routeurs sont des nœuds pouvant participer à l'acheminement des données, ainsi qu'à certaines tâches de maintenance de la topologie.

Le coordinateur est responsable de la création du réseau et du choix de certains paramètres.

ZigBee permet la gestion de trois types de topologies : l'étoile, l'arbre, et la topologie maillée [20].

### **5.3. Systèmes d'exploitation pour capteurs**

#### **5.3.1. TinyOS**

TinyOS est un système d'exploitation libre destiné à la gestion des réseaux de capteurs sans fil. Il est basé sur une architecture orientée composants qui favorise la vitesse et peu d'espace mémoire pour répondre aux contraintes de mémoire imposées par les réseaux de capteurs sans fil [23]. Sa première implémentation a été réalisée en 1999. Ce système d'exploitation est développé en langage NesC. Le développement et la maintenance de ce système est actuellement sous la responsabilité de TinyOS Alliance [24].

#### **5.3.2. Contiki**

Contiki [25] est un système d'exploitation libre, portable et multitâche pour la gestion des réseaux de capteurs sans fil. Il supporte beaucoup de plateformes et son environnement de simulation est netsim.

Contiki implémente la pile protocolaire TCP/IP et ne consomme pas de mémoire. A l'inverse de TinyOS qui se base sur la notion d'événements, Contiki se base sur le multitâche et l'édition statique des liens [26].

### **6. Domaines d'application**

Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement utilisés pour contrôler certaines activités et surveiller des événements dans un domaine ou dans un environnement spécifique. Les réseaux de capteurs sans fil ont trouvé leur place dans une grande variété d'applications et systèmes, avec des besoins et des

caractéristiques nettement différents [27]. Des exemples d'applications potentielles dans différents domaines sont exposés ci-dessous :



Figure 1. 8: Les domaines d'applications dans les RCSFs [27]

### 6.1. Applications militaires

La possibilité de déployer des missions de surveillance sans être humain, via les réseaux de capteurs sans fil, a une grande importance pour les militaires. Les réseaux de capteurs sans fil permettent d'acquérir des informations sur la position et la capacité de l'ennemi, de surveiller les champs de bataille et vérifier le terrain avant d'envoyer des troupes...etc.

### 6.2. Applications médicales et aide à la personne

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans les applications médicales a suscité une attention particulière des chercheurs. A travers des micro-capteurs qui pourraient être implantés sur la peau des malades. Il est possible de recueillir des mesures physiologiques pour le suivi en temps réel des fonctions vitales du malade telles que la surveillance distante de la température, de la glycémie, ou de la pression artérielle...etc.

**6.3. Applications environnementales**

Il existe de nombreuses applications dans la surveillance des paramètres environnementaux tels que la surveillance de la pollution de l'air, la détection des incendies de forêt, la détection des glissements de terrain, la surveillance de la qualité de l'eau, suivie et étude des mouvements d'animaux...etc.

**6.4. Applications industrielles**

Des capteurs peuvent être déployés dans des centres nucléaires ou dans des sites pétroliers pour détecter les fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques,...) et alerter les utilisateurs dans un délai très court pour prévenir des catastrophes éventuelles [28].

**6.5. Applications domestiques**

Dans les smart-home, les capteurs peuvent être installés dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs,... etc. Ces capteurs peuvent communiquer avec un réseau externe à travers l'internet pour alerter un utilisateur localement ou à distance. Il est possible aussi d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : l'éteint de la lumière et l'arrêt de la musique lorsque la chambre est vide, l'ajustement automatique de la climatisation et du chauffage, le déclenchement d'une alarme anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison [29].

**6.6 Applications commerciales**

Des nœuds capteurs pourraient être utilisés dans le suivi du procédé de production à partir la matière première jusqu'à la livraison finale du produit. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient améliorer leur qualité de service par des messages en temps réel et par des produits en bon état et bien vérifiés via des micro-capteurs [30].

### **6.7 Applications à la sécurité**

L'intégration des capteurs dans les grandes infrastructures telles que les ponts ou les bâtiments permet la détection des fissures et les altérations d'une infrastructure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement aussi des capteurs de mouvement dans un système d'alarme peut servir à la détection des intrusions dans une zone d'intérêt telle que les maisons ou banques [31].

### **7. Conclusion**

Les réseaux de capteurs sans fil offrent un intérêt considérable dans la surveillance, la sécurité, l'automatisation et la prévention des catastrophes dans notre vie.

Caractérisés par leur flexibilité, leur cout faible, et leur tolérance aux pannes, ils se sont devenus le centre d'intérêt des chercheurs afin d'automatiser des domaines d'application très variés.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux sans fil de manière générale et les réseaux de capteurs sans fil de façon plus détaillée, nous avons montré les capteurs sans fil avec leurs caractéristiques et leur architecture. Les piles et les modèles de communications sont également abordés.

# **Chapitre2**

## **Les protocoles et les techniques d'optimisation dans les RCSFs**

## **1. Introduction**

Le routage est une méthode d'acheminement des données collectées à une ou plusieurs destinations dans un réseau de connexion. Le problème de routage consiste à déterminer le chemin optimal des paquets de données à travers le réseau au sens d'un certain nombre de critères de performance.

Les protocoles de routage des RCSFs sont influencés par les contraintes de la conservation d'énergie, le temps de livraison de paquets qui doit être minimal, et la fiabilité de la transmission tout en évitant la perte des données. Dans les réseaux de capteurs sans fil, un nœud joue le rôle de source et relais en même temps. De ce fait, la panne d'un capteur peut engendrer une perte considérable d'énergie et un changement total de la topologie du réseau. Dans ce chapitre on va présenter quelques protocoles de routages avec leurs classifications.

## **2. Principes des Techniques de routages**

Le problème de routage des RCSFs est un problème complexe dû à l'absence d'infrastructures fixes (les routeurs, hub et switch...etc). Le principal défi dans le routage est comment déterminer le chemin optimal des paquets à travers le réseau suivant un certain nombre de critères de performance. En effet, un protocole de routage doit assurer le moindre coût en dépenses énergétiques des capteurs et doit garantir une longue durée de survie du réseau, en outre, les paquets de données doivent être reçus par la station de base dans les plus bref délais et le réseau doit aussi être auto-réparant et auto-reconfigurant en cas de défaillance de quelques nœuds [32].

## **3. Principaux protocoles de routage des RCSFs**

La figure suivante résume les principaux protocoles de routage :

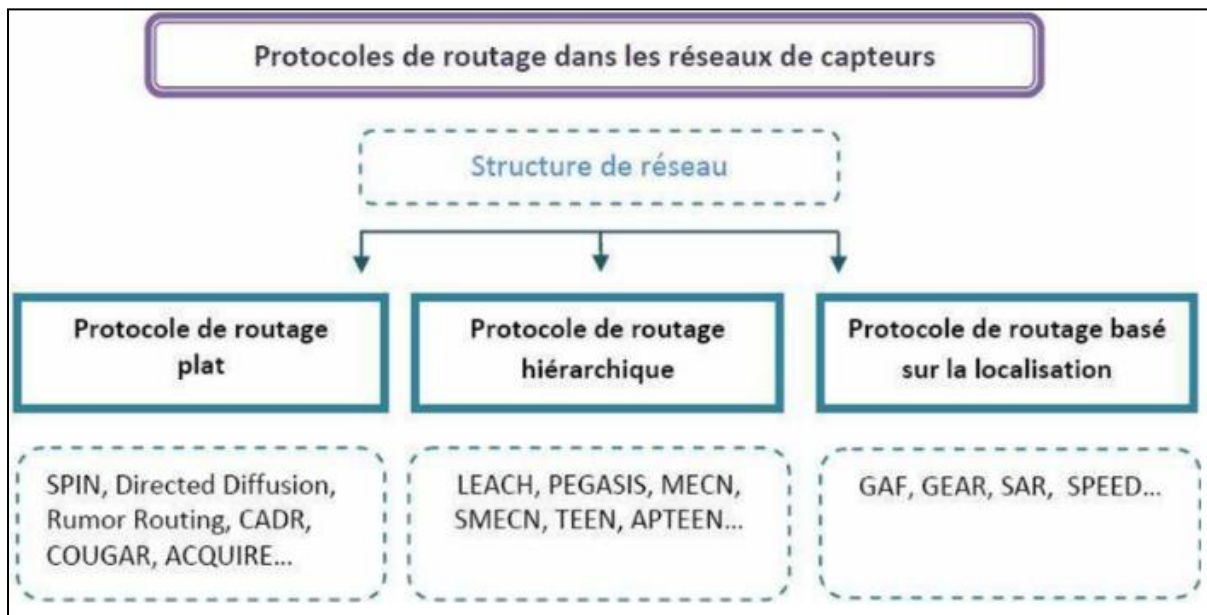


Figure 2. 1: Les principaux protocoles de routage [33]

### 3.1. Les protocoles de routage à plat

Dans ce type de protocoles, chaque nœud est un routeur, il collecte et transmet régulièrement des informations vers ses nœuds voisins. Le protocole de routage de passerelle intérieure et le protocole de routage de passerelle intérieure amélioré sont des exemples courants de protocoles de routage plat [15].

#### 3.1.1. SPIN (Sensor Protocols Information via Negotiation)

Heinzelman et al [16]. Ont proposé une famille de protocoles appelée SPIN

(Sensor Protocols Information via Negotiation), cette famille est basée sur un modèle de négociation pour acheminer l'information dans un réseau de capteurs.

Le but de SPIN est de résoudre les problèmes liés à l'inondation, qui sont [34]:

- L'implosion due à la duplication du même message reçu.
- La cohésion due au déploiement dense des capteurs.
- L'ignorance de la gestion des ressources énergétiques.

Ces trois problèmes influent largement les performances du réseau, pour les pallier SPIN suit deux principes :

-La négociation : SPIN utilise la notion de métadonnées (donnée avec description) lors de l'émission d'une donnée pour que le récepteur choisi de l'accepter ou non. Ce principe permet de régler le problème d'implosion et de chevauchement.

-L'adaptation aux ressources : les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie d'une façon continue et le protocole SPIN adapte son fonctionnement avec le niveau d'énergie restant de chaque nœud. (Figure 2.2).

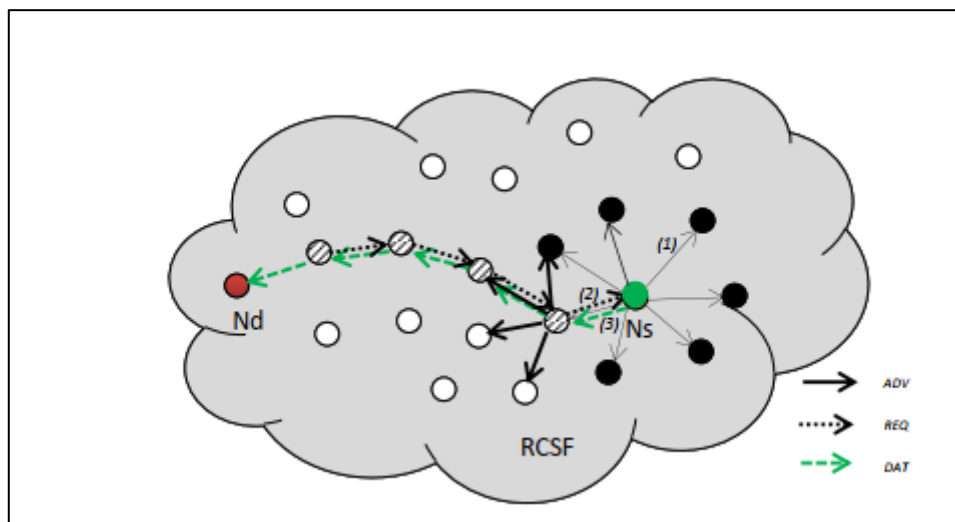


Figure 2. 2 : Protocole de routage SPIN

### 3.1.2. DD (Directed Diffusion)

DD est basé sur le principe suivant :

La station de base envoie une requête à tous les nœuds du réseau. Cette demande est renvoyée par un paquet de réponse appelé gradient représentant le lien de réponse du nœud concerné. La station de base choisit un des chemins par renforcement et si ce dernier échoue, alors un autre chemin doit être choisi. En cas de panne d'un nœud alors la station de base envoie un renforcement négatif

sur son chemin. Chaque chemin a un champ valeur qui correspond au degré du renforcement du gradient et un champ direction désignant le chemin vers la base station (Figure 2.3) [35].

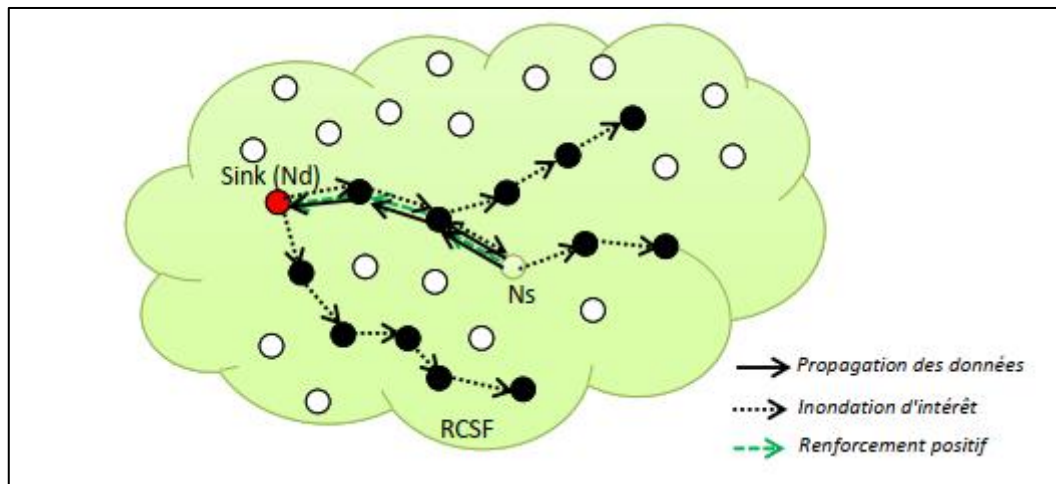


Figure 2. 3: Protocole de routage DD

### 3.2. Protocoles de routage hiérarchique

Les protocoles de routage hiérarchiques sont les plus répandus dans les RCSFs. Leur objectif est de réduire au maximum la consommation d'énergie par division du réseau en groupes (clusters), ayant chacun un cluster-chef qui s'occupe du traitement des données des nœuds normaux de son cluster minimisant ainsi la longueur des routes, et préservant par conséquent, de l'énergie.

Aussi, le cluster-chef collecte périodiquement les données des nœuds membres de son cluster, les compresses, et élimine les redondances et ainsi réduit le nombre de transmissions entre le cluster-chef et la station de base, pour mieux conserver l'énergie du réseau.

Nous présentons ci-dessous quelques exemples de protocoles de routage hiérarchiques :

### 3.2.1. LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Le protocole adaptatif à faible consommation d'énergie basé clustering (LEACH) est l'un des algorithmes les plus populaires pour le routage des RCSFs. Dans cette algorithmes, un nœud décide d'être un CH avec une probabilité  $p$  et diffuse sa décision aux nœuds proches, les autres nœuds non CHs prennent des décisions autonomes et forment des clusters en fonction de la force du signal reçu des clusters heads (CHs), les Clusters Heads sont ensuite utilisés comme passerelles vers la BS. Les traitements de données tels que l'élimination des données redondantes et leur agrégation sont effectués localement au sein de chaque cluster [36].

Le rôle d'être un CH est alterné périodiquement entre les nœuds afin d'équilibrer la consommation d'énergie. La rotation est effectuée en affectant à chaque nœud  $i$  un nombre aléatoire  $T(i)$  compris entre 0 et 1. Un nœud  $i$  devient un CH pour le cycle de rotation en cours (round) si son nombre  $T(i)$  est inférieur au seuil calculé par l'équation suivante [36]:

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

Où  $p$  est le pourcentage souhaité des nœuds CHs de l'ensemble des capteurs existant

$r$  est le nombre du tour actuel (the round)

$G$  est l'ensemble de nœuds qui n'ont pas été des CHs dans les derniers  $1/p$  tours.

Dans le protocole LEACH, chaque tour contient deux phases : la phase de construction (setup phase) et la phase de communication (steady phase).

Le schéma suivant représente la structure du fonctionnement du protocole LEACH :

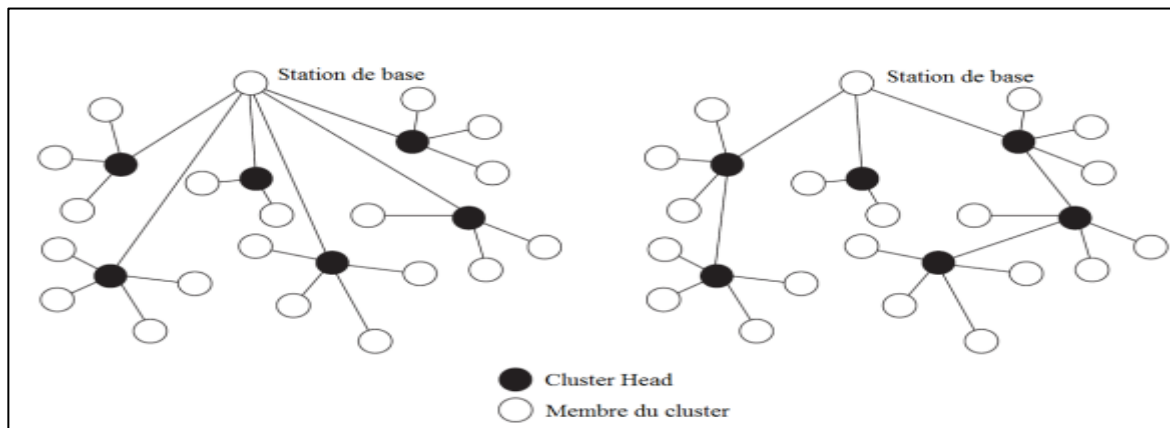


Figure 2. 4: Architecture de communication du protocole LEACH

### 3.2.2. TEEN Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol) a été développé pour modéliser LEACH afin de répondre aux exigences des applications event-driven où un comportement réactif est nécessaire pour le bon fonctionnement du système [37].

TEEN 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 clustering hiérarchique où les nœuds forment des clusters et ce processus se répète jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Le comportement de TEEN est similaire au protocole LEACH. Cependant, quelques différences existent. Les chefs de clusters élus ne transmettent pas un schéma de TDMA, mais émettent un message contenant les informations suivantes [37]:

- Attributs : représentent la tâche demandée au capteur.

- Hard threshold (HT) : détermine la valeur critique après laquelle les membres doivent envoyer leurs rapports de données.
- Soft threshold (ST) : spécifie le changement minimal obligeant le nœud à envoyer un nouveau rapport.

Donc, lorsqu'un nœud s'aperçoit que la valeur captée a dépassé HT, il doit émettre un rapport à son chef de cluster. Il ne réémet un nouveau rapport que si la valeur change radicalement, i.e. : la différence dépasse ST. Ce mécanisme permet d'implémenter un comportement réactif, tout en limitant le nombre de messages transmis.

### **3.3. Les Protocoles géographiques (basés sur la location)**

Les protocoles de routage basés sur la localisation [19] utilisent les informations d'emplacement pour guider la découverte du chemin de routage. La transmission de l'information est donc directionnelle permettant d'éviter l'inondation d'information dans le réseau. Par conséquent, le coût de l'algorithme est réduit et le routage est optimisé et la gestion du réseau devient plus simple. L'inconvénient de ce type de protocoles est que chaque nœud doit connaître l'emplacement des autres nœuds.

#### **3.3.1. MECN (Minimum Energy Communication Network)**

Minimum Energy Communication Network (MECN) [20] est un protocole de routage qui cherche à établir et à entretenir une énergie minimale pour les réseaux sans fil en utilisant des GPS de faible puissance. MECN utilise une station de base comme destination de l'information, ce qui est toujours le cas pour les réseaux de capteurs. MECN identifie un erégion de relais pour chaque nœud. La région de relais se compose de nœuds dans une zone périphérique où la transmission à travers ces nœuds est plus économe en énergie que la transmission directe. L'idée principale de MECN est de trouver un sous-réseau

qui a moins de nœuds et qui nécessite moins d'énergie pour la transmission entre deux nœuds quelconques. Cela est effectué en utilisant une recherche localisée pour chaque nœud en prenant en considération sa région de relais [38].

### **3.3.2. Le protocole de routage GAF (Geographic Adaptive Fidelity)**

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) est un protocole de routage basé sur la localisation des nœuds à l'aide d'un GPS ou d'autres techniques de localisation. Il a été conçu pour les réseaux mobiles ad hoc, et puis appliqué aux réseaux de capteurs sans fil. Son principe est comme suit : une grille virtuelle sur la zone d'intérêt est formée en divisant cette zone en petites zones de telle sorte les nœuds déployés dans les petites zones peuvent tous communiquer.

GAF a contribué considérablement dans la prolongation de la durée de vie du réseau. En effet, un seul nœud de chaque petite zone reste à l'état actif en faisant passer les autres nœuds de cette zone à l'état de sommeil [39].

## **4. Critères de performance des protocoles de routage dans les RCSF**

La performance des réseaux de capteurs sans fil est fondée sur les facteurs suivants [39]:

- **Evolutivité** : Tous les nœuds du réseau doivent être évolutifs ou être en mesure de s'adapter aux changements dans la structure du réseau en fonction de l'utilisateur.
- **L'énergie** : chaque nœud doit savoir combien d'énergie sera utilisée pour effectuer une nouvelle tâche à laquelle il est soumis avant qu'il tombe en panne.
- **Le schéma de transmission**: la transmission de données par les nœuds de capteurs vers la destination ou la station de base se fait par un schéma de routage à un seul saut ou à multi saut.
- **La synchronisation** : dans les communications radio entre les nœuds de capteurs d'un WSN, les capteurs écoutent en permanence les transmissions et

consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés les uns les autres. Pour cela, un nœud doit avoir la même notion de temps pour se mettre en veille et se réveiller que ses voisins.

- **Le contrôle de paquets:** un paquet envoyé avant la transmission entre deux nœuds est appelé le paquet de contrôle. Le paquet de contrôle contient le nombre de bits de données envoyés, l'adresse du nœud de destination et certaines informations qui contribuent à éviter les collisions pendant la transmission.

### **5. La contrainte d'énergie pour le routage**

La consommation d'énergie est la métrique la plus importante dans l'évaluation de la durée de vie des capteurs et des performances d'un réseau de capteurs sans fil. La source d'énergie des capteurs sont des batteries de capacité limitée, et doivent être exploitées de façon optimale pour toute tâche effectuée.

Il existe de nombreux métriques et techniques utilisées par les protocoles de routage afin d'optimiser la consommation d'énergie au niveau de la couche réseau.

#### **5.1. Les sources de consommation d'énergie**

Les sources de consommation d'énergie au niveau de la couche réseau sont diverses [40]:

**La longueur des chemins:** Les paquets de données sont routés via des chemins en un nombre de sauts. L'énergie consommée par un saut est liée à la distance entre les deux nœuds communicants. Les chemins les plus longs sont les plus gaspillant de l'énergie.

**La qualité des liens :** la retransmission des données suite à l'interruption du cheminement entre la source et la destination est une opération qui engendre un coût énergétique supplémentaire.

**Le mode de communication :** le routage point-à-point des protocoles de routage plat est inefficace pour les RCSF car il consomme plus d'énergie des nœuds capteurs. Par ailleurs, les modes de communication adéquats sont en effet le mode « one-to many » et le mode « many-to-one » utilisés généralement dans les protocoles hiérarchiques.

**Le routage de paquets inutiles :** certains paquets de données deviennent inutiles si on ne respecte pas les échéances temporelles des transmissions, fixées soit par l'émetteur ou par le récepteur. Router des données dont l'échéance est expirée engendre une consommation d'énergie inutile.

**Le choix d'un chemin :** La non-prise en compte de l'énergie des nœuds lors du processus d'établissement de chemins peut provoquer l'épuisement des capacités énergétiques de certains nœuds.

## **5.2. Techniques de la conservation d'énergie dans les RCSF**

Parmi les techniques utilisées pour économiser la consommation de l'énergie on cite [40]:

**L'Ajustement des puissances de transmission:** suivant les distances entre les nœuds.

**Distribution des charges :** en distribuant périodiquement les tâches gourmandes en énergie sur tous les nœuds du réseau.

**La formation des grappes :** par division du réseau en groupes. Chaque groupe est constitué d'un nombre de nœuds communicant leur information à un nœud chef considéré comme collecteur, responsable de la coordination de ces nœuds membres en mettant en veille certains nœuds, et en organisant les instances de transmission pour éviter les collisions des signaux des nœuds membres. Le nœud chef est aussi responsable de l'agrégation et la compression des signaux de ces nœuds membres en éliminant ainsi les données redondantes, ce qui réduit

le nombre de transmissions et par conséquent la quantité d'énergie consommée [40].

**Négociation des échanges de données** : Les nœuds du réseau entament une négociation sur les données à transmettre en diffusant un message contenant une métadonnée décrivant les données à transmettre. Les nœuds intéressés par ces données manifestent leur intérêt et les reçoivent en entier. La sélection des nœuds destinataires par l'intérêt réduit la bande passante et la consommation d'énergie du réseau.

## 6. Méthodes de conservation d'énergie dans les RCSF

Nous présentons ci-dessous les différentes méthodes utilisées pour minimiser la consommation d'énergie. Le schéma suivant donne un aperçu, nous distinguons trois méthodes globales : Data-cycling, approches orientées données et la mobilité [41].

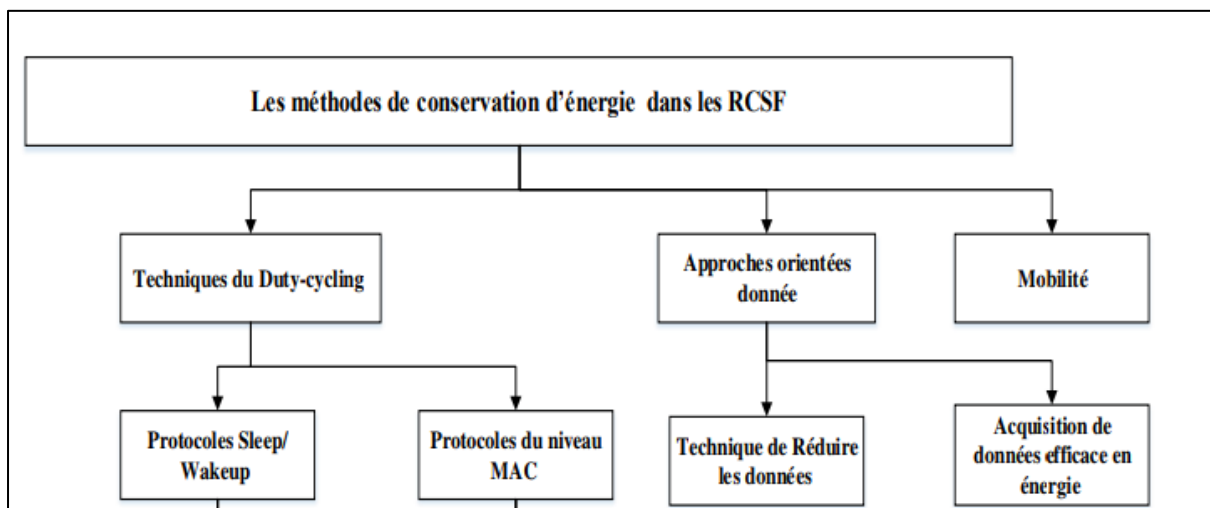


Figure 2.5: Les méthodes de conservation d'énergie [41]

### 6.1. Techniques du Duty-cycling

Consiste à mettre la radio de l'émetteur ou du récepteur en mode veille (low-power) dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir.

**6.1.1. Protocoles Sleep/Wakeup**

Consiste à programmer le temps de réveil et de sommeil de chaque nœud.

**6.1.2. Protocoles du niveau MAC**

Les protocoles MAC les plus communs sont : les protocoles fondés sur TDMA (Time Division Multiple Access) et les protocoles hybrides.

**6.1.2.1. Protocoles MAC reposant sur TDMA**

Dans ce type de protocoles le temps est divisé en trames où chaque trame est divisés en un nombre de temps élémentaires appelés slots de temps. Ensuite, pour chaque nœud capteur plusieurs slots time par trame sont alloués suite à une technique d'ordonnancement. Ainsi, chaque nœud connaît le début et la durée de sa transmission pour une trame donnée. Généralement, un coordonnateur est chargé de la distribution des slots time entre les nœuds du réseau. Ces protocoles basés TDMA sont efficaces en termes de la conservation d'énergie où le module radio d'un certain nœud n'est allumé que pendant ses slots time, et éteint en dehors.

**6.1.2.2. Protocoles MAC hybrides**

L'idée de base des protocoles MAC hybrides est la combinaison entre comportement du protocole TDMA (Time Division Multiple Access) et CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Z-MAC est l'un des protocoles MAC hybrides. Z-MAC commence par une phase de configuration où chaque nœud détermine une liste de ses voisins à deux sauts. Puis, un algorithme d'attribution des slots est appliqué pour n'affecter pas un même slot à deux nœuds dans un voisinage à deux sauts. Par conséquent, la communication d'un nœud avec un de ses voisins à un saut ne se croisent pas.

## 6.2. Approches orientées données

### 6.2.1. Techniques de réduction de données

La compression de données est appliquée pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources. Ce qui réduit considérablement l'énergie de transmission des paquets de données.

### 6.2.2. Acquisition de données efficace en énergie

Ce type de techniques se préoccupe de la minimisation de l'énergie dissipée dans l'étape de détection.

## 6.3. La mobilité

Généralement, les nœuds proches du Sink sont chargés de transférer un plus grand nombre de paquets et donc leur niveau d'énergie s'épuise rapidement. L'utilisation des nœuds Sink mobiles, permettent de résoudre ce problème de la mort rapide de quelques nœuds et aussi d'équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds du réseau.

## 7. Consommation d'énergie dans les RCSF

L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [42].

### 7.1. Modèle de consommation d'énergie

Heinzelman et al, ont proposé un modèle radio de consommation d'énergie.

Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre  $ETx(s,d)$  et recevoir  $ERx(s)$  des messages sont comme suit :

- Pour émettre un message de  $s$  bits vers un récepteur loin de  $d$  mètres, l'émetteur consomme:

$$ETx(s, d) = (elec * s) + (efs * s * d^2) \quad \text{si } d < d_0$$

$$ETx(s, d) = (Eelec * s) + (Eamp * s * d^4) \quad \text{si } d > d_0$$

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

$$E_{Rx}(s) = E_{elec} * s + energie\_traitemen$$

$E_{elec}$  et  $E_{amp}$  représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification (voir figure 2.6)

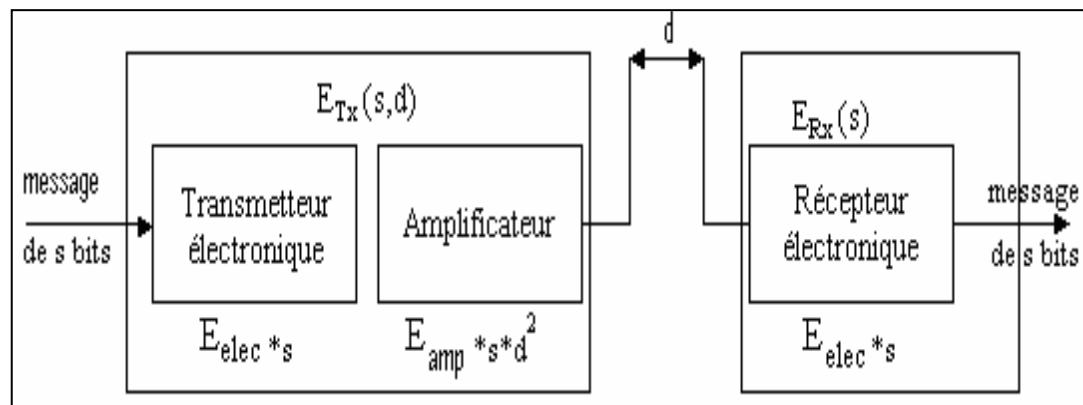


Figure 2.6 : Modèle de consommation d'énergie

## 8. Conclusion

La technologie des réseaux de capteurs reste très prometteuse, et leur défi majeur, est de trouver des protocoles de routage qui permettent, à la fois, de consommer le moins d'énergie possible, assurer la connectivité du réseau et la couverture du champ surveillé, nous avons présenté les principales classes des protocoles de routage dans les RSCFs, et par la suite nous avons montré les différentes techniques de la conservation d'énergie des RSCFs.

# **Chapitre 3**

## **Proposition d'un protocole basé sur DEEC**

**1. Introduction**

Nous avons étudié dans le deuxième chapitre les différents protocoles de routage proposés et les méthodes de conservation d'énergie dans les RCSF. Dans ce chapitre, Nous présentons les protocoles DEEC, DDEEC et BPSO-DEEC Afin de réduire la consommation d'énergie du réseau de capteurs sans fil hétérogène et d'allonger sa durée de survie. En se basant sur le principe du protocole de routage DEEC, un protocole de routage utilisant l'algorithme d'optimisation par essaims de particules binaires (BPSO) dans la phase de configuration du protocole DEEC a été proposé. DEEC est ainsi modifié et amélioré dans sa phase de sélection des clusters chefs (CHs) à l'aide de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules binaires. Le BPSO est utilisé afin de bénéficier de sa capacité de recherche dans la localisation des CHs optimaux pour une durée de vie plus longue du réseau de capteurs. L'approche proposée est ainsi appliquée sur un réseau hétérogène à deux niveaux comme DEEC. Le nouveau protocole BPSO-DEEC empêche la mort précoce des nœuds à travers l'équilibrage de l'utilisation des ressources d'énergie des nœuds du réseau, ce qui a amélioré le temps de leur survie.

Les résultats expérimentaux sous MATLAB ont été satisfaisants et prouvent la supériorité du protocole proposé par rapport à DEEC et DDEEC en termes de la conservation d'énergie des nœuds et de l'extension de la durée de vie du réseau.

**Travaux Connexes :**

La consommation d'énergie et la durée de vie du réseau sont les caractéristiques les plus importantes dans la conception du réseau de capteurs sans fil. Cette étude présente le routage basé sur le clustering pour les WSNs. De nombreux protocoles basés sur le clustering sont homogènes, tels que LEACH, PEGASIS et HEED.

Les Cluster Heads collectent des données auprès de leurs membres les agrègent et les acheminent vers la station de base. Ce processus surcharge le CH et consomme beaucoup d'énergie. Dans LEACH, les CH sont sélectionnés périodiquement et consomment une énergie uniforme en sélectionnant un nouveau CH à chaque tour. Un nœud devient CH dans le tour actuel sur la base d'une probabilité  $p$ .

Contrairement au protocole LEACH où les CHs envoient des données à la station de base directement en un seul saut, le protocole TL-LEACH (A Two-Levels Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) fonctionne dans la hiérarchie à deux niveaux. Dans TL-LEACH, les CHs de niveau 1 se connectent aux nœuds capteurs membres correspondants. Les CHs du deuxième niveau créent des grappes à partir des CHs du premier niveau. Les données agrégées de chaque CH sont recueillies par un CH du second niveau et puis transmis à la station de base [43].

Dans PEGASIS [20], les nœuds forment une chaîne pour transmettre les données d'une source au sink. Le processus de construction de la chaîne nécessite une connaissance globale des nœuds capteurs, par conséquent, il est très difficile de mettre en œuvre ce protocole.

Un autre protocole basé clustering est HEED (Hybrid, Energy-Efficient, Distributed approach) dans lequel les CHs sont sélectionnés sur la base d'une probabilité. La probabilité qu'un nœud devienne CH est liée à l'énergie résiduelle du nœud.

Le protocole SEP est conçu pour les réseaux hétérogènes. Les nœuds SEP sont hétérogènes en termes d'énergie initiale, appelés nœuds normaux et nœuds avancés. La probabilité de devenir CH dépend de l'énergie initiale du nœud.

## 2. Le protocole : DEEC

DEEC est un protocole d'efficacité énergétique bien connu pour les RCSFs hétérogènes. En DEEC, le réseau est divisé en différents clusters. Chaque cluster contient des nœuds capteurs et possède un CH. Le rôle du CH consiste à recevoir les informations des nœuds capteurs au sein d'un cluster et à envoyer ces informations à la station de base. Pour faire du nœud un Cluster Head (CH), une fonction de probabilité est calculée. Cette fonction est définie en termes d'énergie résiduelle et d'énergie moyenne du réseau. Cette fonction calcule le rapport entre l'énergie résiduelle de chaque nœud et l'énergie moyenne du réseau et elle est calculée pour chaque nœud d'un cluster. Le nœud ayant une valeur de la fonction probabiliste plus élevée par rapport aux autres nœuds possède une plus grande chance d'être sélectionné en tant que CH. Dans les RCSFs, les CHs sont choisis périodiquement. Un algorithme de sélection de CHs est adopté pour cela. Le rôle principal du CH est de collecter les données au sein d'un cluster et de les envoyer à la station de base. Il est également supposé que tous les nœuds du RCSF ayant initialement une quantité d'énergie différente et les nœuds nouvellement ajoutés ou les nœuds à récupération d'énergie ont plus d'énergie que les anciens. On note également que la probabilité des CHs est également influencée par le rapport entre l'énergie résiduelle de chaque nœud et l'énergie moyenne du réseau [44].

Le protocole DEEC inclut l'énergie résiduelle et moyenne des nœuds dans les probabilités de sélection de CHs. Pour un réseau hétérogène à deux niveaux, les probabilités de sélection pour les nœuds normaux et avancés sont les suivantes [32]:

$$P_{inorm} = \frac{P \cdot E_i(r)}{(1 + a \cdot m) \bar{E}(r)} \quad (1)$$

$$P_{iadvan} = \frac{P \cdot (1 + a) \cdot E_i(r)}{(1 + a \cdot m) \bar{E}(r)} \quad (2)$$

Avec

$E_i \cdot a$  est l'énergie initiale d'un nœud normal.

$E_i \cdot (a+1)$  est l'énergie initiale d'un nœud avancée

$E_i(r)$  est l'énergie résiduelle du nœud  $i$

$\bar{E}(r)$  est l'énergie moyenne du réseau dans un round  $r$ , calculée comme suit:

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} \cdot E_{total} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad (3)$$

Avec

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}}$$

$$E_{round} = k(2NE_{elec} + NE_{da} + k \cdot Emp \cdot d_{CHtoBS}^4 + N \cdot Efsd_{NtoCH}^2)$$

$$d_{toCH} = \frac{M}{\sqrt{2\pi k}}, \quad d_{toBS} = 0.765 \frac{M}{2}$$

Pour un réseau hétérogène à plusieurs niveaux, la probabilité  $p_i$  pour la sélection CH est calculée par l'équation (eq4) [44]:

$$P_i = \frac{P \cdot N(1 + a) \cdot E_i(r)}{(N + \sum_{i=1}^N a_i) \cdot \bar{E}(r)} \quad (4)$$

Dans nos expérimentations, " $P$ " est le pourcentage souhaité de CHs, et nous avons utilisé la probabilité de (eq 4) pour sélectionner les CHs, c'est-à-dire que chaque nœud, génère une valeur aléatoire entre (0 et 1), si cette valeur est inférieure au seuil calculé par eq (5) (ci-dessous) sur  $p_i$  calculé par l'équation (eq4) alors ce nœud devient un CH [45], [44] :

$$\begin{cases} T(S_i) = \frac{P_i}{1 - P_i * r \bmod(\frac{1}{P_i})} & S_i \in G \\ T(S_i) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad eq (5)$$

Où:

r: le tour (round) courant

G: l'ensemble des nœuds non élus comme CH pendant les  $\frac{1}{P_i}$  tours précédents ;

une façon d'alterner le rôle d'un CH entre les nœuds pour prolonger leurs durées de vie.

La phase de communication est basée sur le modèle de la radio signal que nous avons exposé dans la section4 de ce chapitre.

### 3. Le protocole DDEEC

Le DDEEC a été proposé pour résoudre le problème trouvé dans le DEEC. Ce problème est que les nœuds avancés sont continuellement plus punis que les nœuds normaux même si leurs énergies deviennent équivalentes, ce qui conduit à leurs morts précoces. Le protocole DDEEC est similaire à DEEC dans le calcul de l'énergie moyenne du réseau,  $\bar{E}(r)$ , et la probabilité de seuil utilisée pour sélectionner les CHs. Le DDEEC a introduit un seuil  $ThREV$  basé sur l'énergie résiduelle dans la probabilité de chaque nœud comme décrit ci-dessous :

$$P_i = \frac{P \cdot E_i(r)}{(1+a.m) \cdot \bar{E}(r)} \text{ if } E_i(r) > Th$$

$$P_i = \frac{P \cdot E_i(r) \cdot (1+a)}{(1+a.m) \cdot \bar{E}(r)} \text{ if } E_i(r) > Th$$
(6)

$$P_i = C \cdot \frac{P \cdot E_i(r) \cdot (1 + a)}{(1 + a \cdot m) \cdot \bar{E}(r)} \text{ if } E_i(r) \leq Th$$

Où  $c$  est une valeur positive,  $Th = (E_0 \cdot b)$ , avec  $c \in [0,1]$ ,  $E_0$  : l'énergie initiale.

#### 4. Le modèle énergétique

Un nœud capteur épuise son énergie, principalement lors de la transmission et la réception des données, on a considéré le modèle d'énergie radio [46] qui fonctionne dans des modes à deux canaux, à savoir un modèle d'espace libre et un modèle de canal à trajets multiples.

Heinzelman et al [46], ont proposé un modèle radio de consommation d'énergie. Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre  $ETx(s,d)$  et recevoir  $ERx(s)$  des messages sont comme suit :

- Pour émettre un message de  $s$  bits vers un récepteur loin de  $d$  mètres, l'émetteur consomme:

$$ETx(s, d) = (elec * s) + (efs * s * d^2) \quad \text{si } d < d_0$$

$$ETx(s, d) = (Eelec * s) + (Eamp * s * d^4) \quad \text{si } d > d_0$$

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

$$ERx(s) = Eelec * s + energie\_traitemen$$

$Eelec$  et  $Eamp$  représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification.

#### 5. Optimisation Par Essaims de Particule

PSO est un algorithme simple et efficace qui commence par un certain nombre de particules placées de manière aléatoire dans l'espace de recherche et initialisées avec des vitesses aléatoires.

La variante de base de PSO fonctionne avec une population (appelée essaim) de solutions candidates (appelées particules). Ces particules sont déplacées dans l'espace de recherche selon quelques formules simples. Le déplacement des

particules est guidé par leur propre meilleure position dans l'espace de recherche ainsi que par la meilleure position trouvée par l'ensemble de l'essaim.

Soit  $S$  le nombre de particules dans l'essaim, chacune ayant une position  $x_i \in \mathbb{R}^n$  dans l'espace de recherche et une vitesse  $v_i \in \mathbb{R}^n$ . Soit  $p_i$  la meilleure position trouvée par la particule  $i$  et soit  $g$  la meilleure position trouvée par l'ensemble de l'essaim. L'algorithme PSO de base est comme suit [47]:

---

pour chaque particule  $i = 1, \dots, S$  do

    Initialiser la position de la particule avec un vecteur aléatoire uniformément distribué :  $x_i \sim U(\text{Lim\_inf}, \text{Lim\_sup})$

    Initialise la meilleure position personnelle de la particule à sa position initiale :  $p_i \leftarrow x_i$

    si  $f(p_i) < f(g)$  alors

        mettre à jour la meilleure position trouvée par l'essaim :  $g \leftarrow p_i$

    Initialiser la vitesse de la particule :  $v_i \sim U(-\text{Lim\_inf}, \text{Lim\_sup})$

tant qu'un critère de terminaison n'est pas rempli, faire :

    pour chaque particule  $i = 1, \dots, S$  faire

        pour chaque dimension  $d = 1, \dots, n$  faire

            Choisissez des nombres aléatoires :  $C1, C2 \sim U(0,1)$

            Mettre à jour la vitesse de la particule :

$v_{i,d} \leftarrow w v_{i,d} + \varphi_p C1 (p_{i,d} - x_{i,d}) + \varphi_g C2 (g_d - x_{i,d})$

$\varphi_p$  et  $\varphi_g = 1.49$  (dans nos test )

            Mettre à jour la position de la particule :  $x_i \leftarrow x_i + v_i$

            si  $f(x_i) < f(p_i)$  alors

                Mettre à jour la meilleure position personnelle de la particule :  $p_i \leftarrow x_i$

            si  $f(p_i) < f(g)$  alors

                Mettre à jour la meilleure position trouvée par l'essaim :  $g \leftarrow p_i$

---

L'optimisation par essaim de particules binaires (BPSO) est un algorithme inspiré de PSO, mais adapté à la recherche des solutions binaires, BPSO est aussi une approche basée population où chaque particule représente une solution potentielle constituée d'éléments binaires (0 ou 1). Pour chaque itération, une nouvelle population avec le même nombre initial de particules est produite. La création d'une nouvelle population est basée sur la précédente en utilisant les règles de PSO pour déplacer les particules vers les meilleures solutions trouvées. La principale différence entre PSO et BPSO, est que les vitesses des particules binaires sont limitées dans l'intervalle [0,1]. La fonction sigmoïde est généralement employée pour la normalisation de la vitesse dans l'intervalle [0,1]

$$V'_{i,d}(t) = \text{sig}(v_{i,d}(t)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{i,d}(t)}}$$

Ainsi, les équations récursives de PSO sont utilisées pour mettre à jour les vitesses des particules, Les vitesses de particules sont ensuite normalisées par la fonction sigmoïde, et les nouvelles positions de particules sont recalculées par l'équation suivante :

$$x_{i,d}(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{i,d} < \text{sig}(v_{i,d}(t+1)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Avec  $r_{i,d}$  est un nombre aléatoirement choisi dans l'intervalle [0,1]

## 6. La sélection de CHs basée sur PSO binaire

En PSO, une population de solutions est initialisée, appelée l'essaim de particules. La population générée est affinée en appliquant des équations récursives de PSO. Une fois que le nombre d'itérations défini est atteint, la solution avec la meilleure valeur de fitness d'une fonction objective est

considérée comme la solution finale (optimale). La méthode de clustering basée sur BPSO est utilisée pour sélectionner l'ensemble de clusters chefs optimal avec leur nombre optimal à partir de l'ensemble des nœuds capteurs du réseau.

Dans ce travail, le codage binaire est employé pour représenter l'ensemble des clusters-chefs (CHs).

**6.1. Représentation des particules**

Comme mentionné précédemment, chaque solution ou particule est un vecteur de valeurs binaires. La taille de chaque particule est égale au nombre de nœuds du réseau. La valeur d'index du vecteur particule est considérée comme le numéro identificateur du nœud, et sa valeur (1 ou 0) indique respectivement que le nœud est sélectionné ou non comme un cluster chef, pour chaque particule, si la valeur associée à un nœud est à 1, alors le nœud fonctionne comme cluster chef et si sa valeur est à «0», alors le nœud correspondant fonctionne comme un nœud membre d'un cluster le plus proche en terme de distance.

De plus, une autre variable binaire est employée pour indiquer si le nœud a épuisé ou non son énergie.

Un exemple de la représentation adoptée est montré par la figure suivante, où chaque particule est de taille N (N nœuds sont considérés):

1	2								N		Identificateur de chaque nœud
1	0	1	0	0	1	0	1	0	1		Etat du Nœud : Cluster chef ou non
S(1)	S(2)	..	..	..	..	..	..	..	S(N)		

↑  
S(N) : une structure composée de plusieurs variables indiquant l'état de nœud capteurs notamment : valeur d'énergie, épuisé ou non, et le nombre de fois sélectionné comme cluster chef.

## 6.2. La fonction objective

La fonction de fitness employée est la somme des énergies résiduelles des CHs d'une particule divisé par  $\bar{E}(r)$

$\bar{E}(r)$  est l'énergie moyenne par round  $r$  calculée comme suit :

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} \cdot E_{\text{total}} \left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

$R = r_{\text{max}}$ : le nombre maximum de rounds dans nos test expérimentaux

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit trois protocoles de routage hétérogènes économes en énergie et basé clustering pour minimiser la consommation d'énergie du réseau de capteurs, notamment DEEC, DDEEC et BPSO-DEEC. Dans ces trois type de protocoles, le réseau est divisé en clusters. Chaque cluster possède son propre cluster-chef responsable de l'agrégation des données de ses nœuds membres. Deux différents niveaux d'énergie ont été considérés dans les trois protocoles : des nœuds normaux, et nœuds avancés ayant plus d'énergie. La particularité du protocole proposé BPSO-DEEC par rapport aux deux autres protocoles est que ce dernier est basé sur la méthode d'optimisation par essaim de particules binaire dans phase de sélection des cluster-chef. L'objectif est de trouver l'ensemble de cluster-chefs optimaux avec leur nombre optimal pour optimiser la consommation d'énergie du réseau et étendre sa durée de vie.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats de la simulation sous MATLAB.

# **Chapitre4**

## **Simulation et**

### **résultats**

#### **expérimentaux**

## **1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons le Scénario de simulation et les résultats obtenus, nous discutons en détail les résultats de la simulation par comparaison à DEEC et DDEEC.

### **• Mise en œuvre**

Les simulations ont été réalisées sur PC avec processeur double core® I7 5<sup>ème</sup> génération 2.8 GHz avec un système d'exploitation Windows 10 et le logiciel MATLAB (r 2018 a) a été utilisé comme plate-forme de simulation.

## **2. Présentation du logiciel MATLAB**

Le nom MATLAB vient de l'anglais MATrix LABoratory, une traduction littérale nous amène à voir MATLAB comme un laboratoire pour manipuler des matrices. Nous reviendrons sur ce point, qui est un élément fondamental du langage MATLAB. La plupart des fonctions définies dans MATLAB sont pour des grandeurs matricielles, et par extension, pour des données tabulées. MATLAB comprend de nombreuses fonctions, de calcul ou de traitements de données, d'affichage, de tracés de courbes, de résolution de systèmes et d'algorithmes de calculs numériques au sens large du terme. Toutes ces fonctions sont définies par défaut dans le langage de programmation MATLAB. Ce langage comprend de nombreuses fonctions prédéfinies pour le calcul matriciel, mais pas seulement. De ce fait, les domaines d'application sont extrêmement variés, et l'on peut citer par exemple :

- Le calcul numérique dans le corps des réels ou des complexes.
- Le calcul de probabilités et les statistiques.
- Le calcul intégral ou la dérivation.
- Le traitement du signal.

- Le calcul numérique dans le corps des réels ou des complexes.
- Le calcul de probabilités et les statistiques.
- Le calcul intégral ou la dérivation.
- Le traitement du signal.
- L'optimisation.
- Le traitement d'image.
- L'automatisme.

Il existe aussi dans MATLAB des fonctions plus spécifiques regroupées dans des TOOLBOX (que l'on peut traduire par "boîte à outils"). Ces Toolbox sont des extensions évidemment payantes utiles, voire nécessaires, comportant des fonctions dédiées à ces domaines, pour des développements de niveau professionnel. On peut citer quelques extensions :

- OPTIMIZATION pour l'optimisation.
- IMAGE PROCESSING pour le traitement d'image.

### **3. Résultats et discussion**

Les performances du protocole proposé ont été évaluées en termes, d'énergie résiduelle du réseau (la durée de vie du réseau), le nombre des nœuds morts et le nombre de paquets délivrés à la station de base au cours des différents tours (rounds).

●Paramètres initiaux

Paramètre	Valeur
Les coordonnées du sink	Sink.x=50, Sink.y=50
Nombre des nœuds	50 et puis 100
Energie initiale de chaque nœud	0.5
Eelec (énergie du circuit électronique)	$50 \cdot 10^{-9}$
Emp (énergie d'amplificateur)	$100 \cdot 10^{-12}$
EDA (énergie d'agrégation)	$5 \cdot 10^{-9}$
K(taille d'un paquet de données)	4000

Table 4.1 : Paramètres du réseau

Paramètre	Valeur
Nombre de particules	20
$C1=C2$	1.49
W(le poids d'inertie)	0.78
Les limites de la vitesse	[-5, 5]

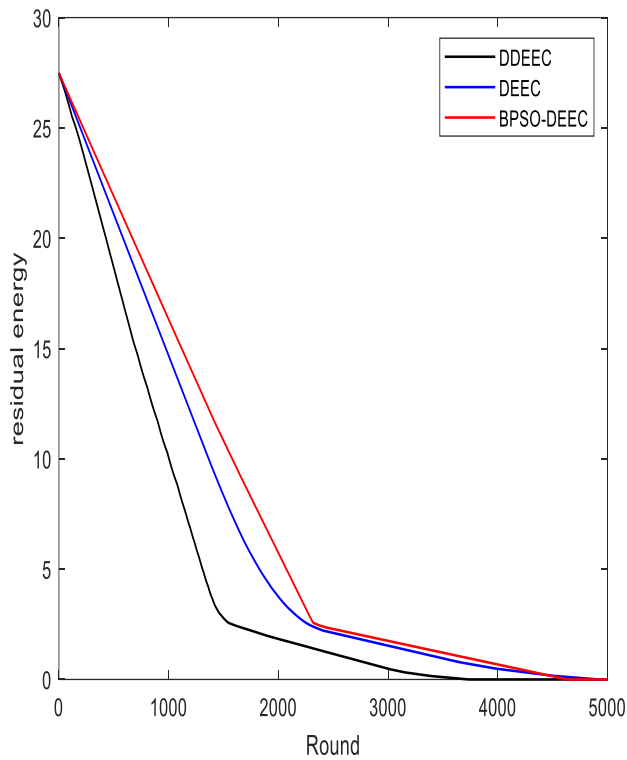
Table 4.2 : Paramètres du BPSO

Ci-dessous est l'ensemble des courbes comparatifs entre DEEC, DDEEC et BPSO-DEEC en terme de l'énergie résiduelle, le nombre de nœuds deads(morts) et le nombre de paquets délivrés à la SB au cours des rounds.

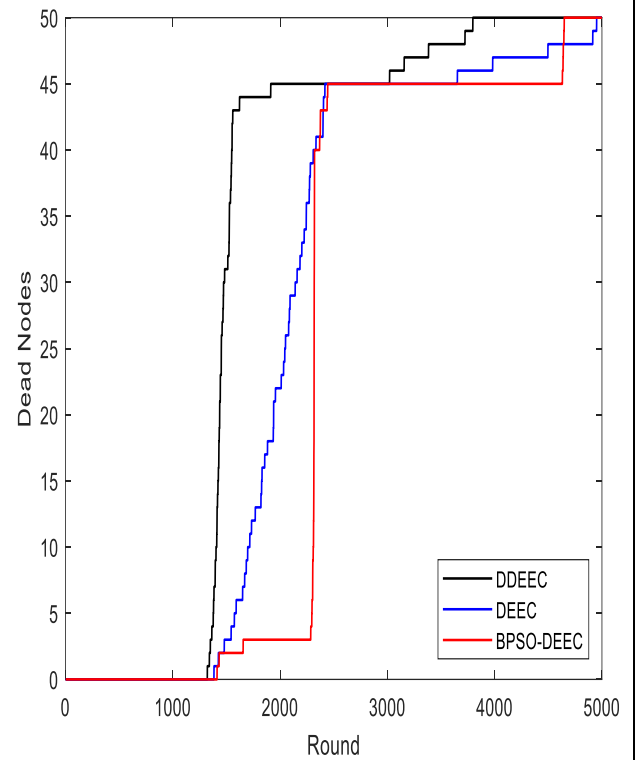
Courbes comparatifs (DEECDDEEC & BPSO-DEEC)

Expérience 1 : 50 nœuds dans une zone de détection 100\*100

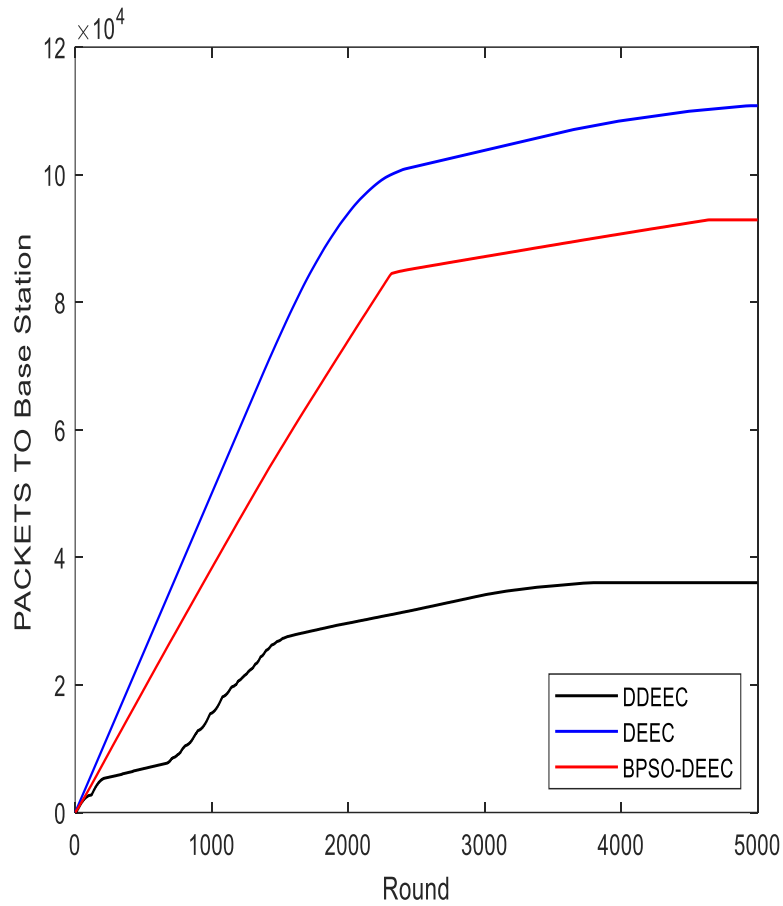
En termes d'énergie résiduelle



En termes de nœuds morts

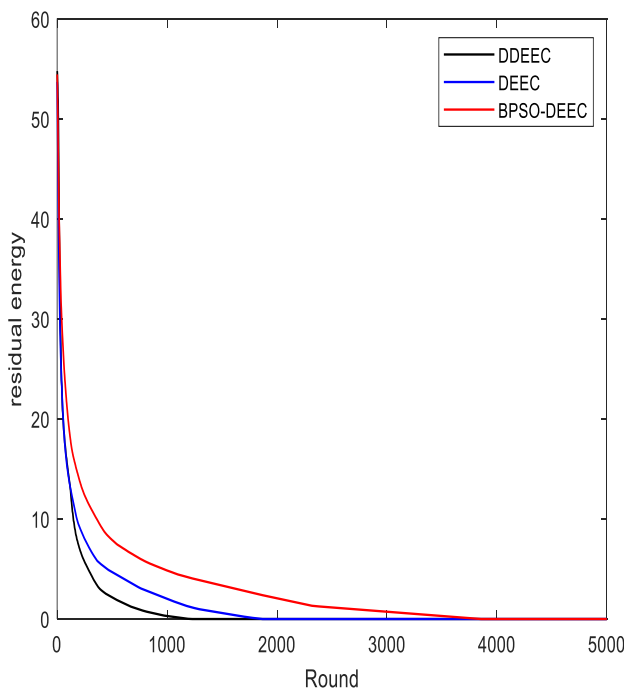


En termes du nombre de paquets délivrés à la station de base

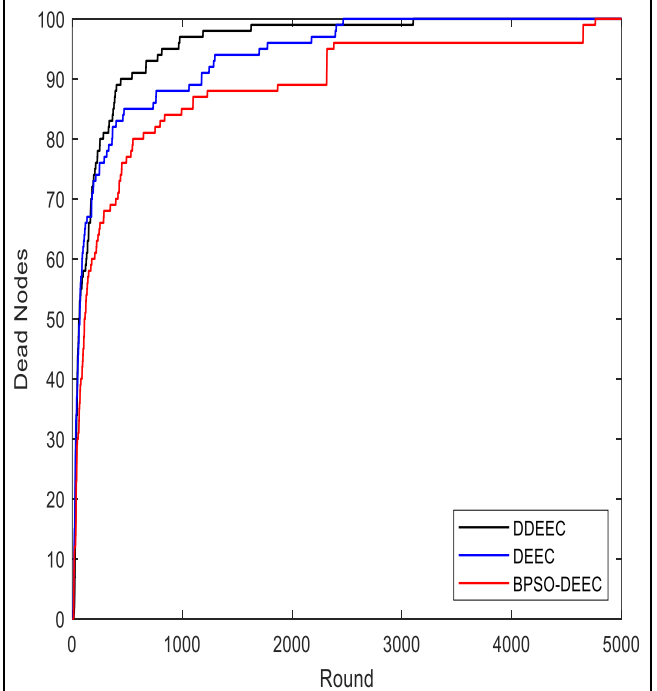


**Expérience 2 : 100 nœuds dans une zone de détection 500\*500**

En termes d'énergie résiduelle



En termes de nœuds morts



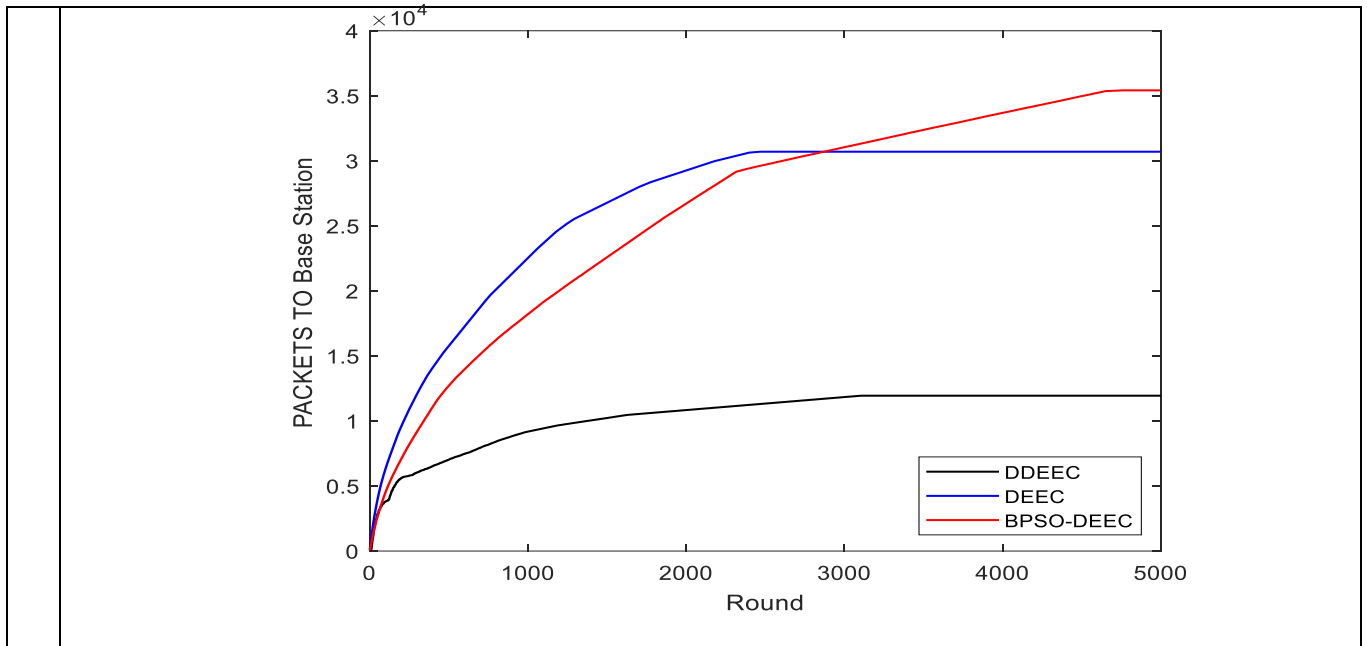


Figure 4.1: Courbes comparatifs (DEEC, DDEEC & BPSO-DEEC)

Et ci-dessous sont les données numériques correspondantes aux courbes précédentes de la 1<sup>ère</sup> expérience.

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1400 1 <sup>er</sup> mort	10.8282	48	0.0160
2300duré stabilité	2.7240	44	0.0150
2500 mort totale	2.2873	5	0

Table 4.3: les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-DEEC de la figure 4.1

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1400 1 <sup>er</sup> mort	9.5575	49	0
2200duré stabilité	2.7551	18	0
2500 mort totale	2.1095	5	0

Table 4.4: les données numériques correspondantes aux courbes BPSO-DEEC de la figure 4.1

Round	Energie résiduelle	Nœuds opérationnels	Time cpu(ms)
1400 1 <sup>er</sup> mort	3.6471	41	0.0150
1500 durée stabilité	2.7845	19	0
2000 mort totale	1.8390	5	0

Table 4.5: les données numériques correspondantes aux courbes DDEEC de la figure 4.1

A partir des courbes et tableaux précédents, il est clair que l'approche proposée basée sur DEEC modifié en utilisant la méthode d'optimisation BPSO, surpasse DDEEC et DEEC en terme de la conservation d'énergie et la durée de vie du réseau.

#### 4. Conclusion

Dans ce travail, le protocole de routage des réseaux de capteurs sans fil DEEC a été modifié et amélioré par une méthode d'optimisation globale qui est l'algorithme d'optimisation par essaim de particules binaires. Cet algorithme a été utilisé pour rechercher l'ensemble de cluster head (CHs) optimaux dans la phase de sélection du protocole DEEC.

La fonction objective employée dans le guide de la recherche des CHs est la somme de l'énergie résiduelle des capteurs divisée par l'énergie résiduelle moyenne du réseau dans un round, simulant ainsi le principe de base du protocole DEEC.

La spécificité du protocole proposé BPSO-DEEC par rapport à DEEC et que ce dernier se base sur les énergies résiduelles des nœuds, leurs types et leur pourcentage dans le réseau et le rth énergie moyenne du réseau à travers des équations probabilistes. Alors que la méthode proposée recherche les CHs optimaux par un algorithme d'optimisation globale basé sur une fonction objective qui tient en compte l'énergie résiduelle des capteurs, et le rth énergie

moyenne du réseau. Les deux protocoles sont appliqués sur des réseaux hétérogènes à deux niveaux (deux types de nœuds).

Les résultats expérimentaux ont montré que la méthode proposée BPSO-DEEC surpasse clairement DDEEC, et DEEC en termes de la durée de vie du réseau et la conservation d'énergie.

## **Conclusion générale**

Le développement de la technologie de réseau de capteurs sans fil (RCSF) a connu une croissance positive au cours de ces dernières années grâce à leurs diverses fonctionnalités.

Dans ce mémoire, nous avons abordé le sujet des réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'application, leurs protocoles de routages et les différentes techniques de la conservation de leur énergie.

Ensuite, nous avons proposé un protocole de routage efficace en termes de la conservation d'énergie BPSO-DEEC, ce dernier est basé sur BPSO pour trouver les CHs optimaux permettant une plus longue durée du réseau.

BPSO-DEEC a été comparé à DEEC et DDEEC sous le simulateur MATLAB. Les simulations ont montré des bons résultats dans la plupart des cas, une consommation énergétique bien réduite par rapport à ces deux protocoles hétérogènes et par conséquent une plus longue durée de vie du réseau.

## **Bibliographie**

- [1] Diery Ngom. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2016. Français. ffNNT : 2016MULH9134ff. fftel-01531464f.
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau\\_de\\_capteurs\\_sans\\_fil](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_capteurs_sans_fil).
- [3] yaser yousef. Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Autre [cs.OH]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010. Français. ffNNT : 2010MULH3206ff. fftel-00590407.
- [4] S Naima -2015 tel.archives-ouvertes.fr.
- [5] <https://datatracker.ietf.org/wg/manet/documents/>, 01/10/2019.
- [6] S. Corsons, J. Macker : "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considérations", RFC 2501, 1999.
- [7] HAMID Mouna, ROUAM Rania, optimization de déploiement et de localisation de cible dans les réseaux de capteurs sans fil, mémoire de master, 2019.
- [8] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. "Wireless sensor networks :àSurvey". Computer Networks 38, Elsevier Science, pp. 393–422, 200.
- [9] <http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/AurelieBunel/Presentation.html>.
- [10] TinyOS. <http://www.tinyos.net/>, 2010.
- [11] Messai Mohamed Lamine, Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil, Mémoire de Magistère en Informatique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2008.
- [12] Cristian Duran Faundez, Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie, thèse de doctorat, 2009.
- [13] Equipe de Get 2005 Capt'Ad-hoc. "Sensor networks : State of the art". Technical Report, Telecom Paris, ENST Br, INT, INRIA, Mars 2006.

- [14] Mohammed et Hichem MEKIDICHE, La géo localisation de réseaux capteurs (algorithme DVHOP ), mémoire de master.
- [15] Lynda Tlili, Modèle De Confiance Pour Sécuriser Le Routage Dans Les Réseaux De Capteurs Sans-Fil, Mémoire De Master, 2011.
- [16] [https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module\\_RCSF\\_14.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_14.html).
- [17] AKYILDIZ, Ian F., SU, Weilian, SANKARASUBRAMANIAM, Yogesh, et al. A survey on sensor networks. Communications magazine, IEEE, 2002, vol. 40, no 8, p. 102-114.
- [18] Sarra MESSAI, Gestion de la Mobilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil, thèse de doctorat, 2019.
- [19] Benhessine keltoum, Lansari Amal, Une nouvelle technique pour la minimisation de la consommation d'énergie dans le RCSF, mémoire de master, 2021.
- [20] Diery Ngom. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2016.
- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15.4#:~:text=Le%20802.15.4%20est%20un,des%20dispositifs%20utilisant%20ce%20protocole](https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4#:~:text=Le%20802.15.4%20est%20un,des%20dispositifs%20utilisant%20ce%20protocole).
- [22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/ZigBee#:~:text=ZigBee%20est%20un%20protocole%20de,Personal%20Area%20Networks%20%3A%20WPAN\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/ZigBee#:~:text=ZigBee%20est%20un%20protocole%20de,Personal%20Area%20Networks%20%3A%20WPAN)).
- [23] site web de tinyos", 2003. <http://www.tinyos.net>.
- [24] Wikipedia. \tinyos". site web, 2008. <http://en.wikipedia.org/wiki/TinyOS>.
- [25] Contiki. web site. <http://www.sics.se/contiki>.
- [26] Adam Dunkels, Björn Grönvall, and Thiemo Voigt. Contiki { a lightweight and exible operating system for tiny networked sensors. IEEE EmNetS-I, November 2004. Swedish Institute of Computer Science.

- [27] ROMER, Kay et MATTERN, Friedemann. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 2004, vol. 11, no 6, p. 54-61.
- [28] Samir ATHMANI, Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil, thèse de Magistère, 2010.
- [29] Abdelbari BEN YAGOUTA, WIRELESS SENSORS NETWORKS :Architectures, Applications & Limitations, Communication System Laboratory Sys'Com, National Engineering School of Tunis.
- [30] MOKDES Lydia et LOUNI Meriem, Amélioration de l'algorithme de routage hiérarchique LEACH, mémoire de master, 2014.
- [31] Lynda TLILI, Modèle De Confiance Pour Securiser Le Routage Dans Les Reseaux De Capteurs Sans-Fil, mémoire de master, 2011.
- [32] Mehdi Bouallegue. Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Réseaux et télécommunications [cs.NI]*. Université du Maine, 2016. Français. 2016.
- [33] Bouaissa Aboubakeur, Messous Mohamed Ayoub, Supervision de l'opération d'irrigation des arbres fruitiers à l'aide des réseaux de capteurs sans fil, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, 2010.
- [34] YACINE CHALLAL, Réseaux de Capteurs Sans Fils, Support de cours, 2008.
- [35] Diery Ngom. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau. *Réseaux et télécommunications [cs.NI]*. Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2016.
- [36] Wafa Akkari et al. / *Procedia Computer Science* 52 ( 2015 ) 365 – 372.
- [37] [https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module\\_RCSF\\_79.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_79.html).
- [38] K. Akkaya, and M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor.
- [39] yaser yousef. Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Autre [cs.OH]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010.
- [40] NASSER Messaoud et BAKHOUYA Abdellah, Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, 2021.

- [41] Rahim KACIMI, Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil, thèse de doctorat, 2009.
- [42] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava, "Energy-aware wireless Micro sensor networks". IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No. 2, March 2002, pp.40-50.
- [43] Abdallah BANANA, Vers une plate-forme efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil, mémoire de master, 2018.
- [44] Sercan Vançin and EbubekirErdem, Threshold Balanced Sampled DEEC Model for Heterogeneous Wireless Sensor Networks, Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2018, Article ID 4618056, 12 pages.
- [45] WafaAkkari et al. / Procedia Computer Science 52 ( 2015 ) 365 – 372
- [46] Sofiane Moad « Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil » Rapport de stage Master : Recherche 2 en Informatique Université IFSIC-Rennes 1 Laboratoire de recherche : DYONISOS IRISA Année universitaire : 2007-2008.
- [47] [https://en.wikipedia.org/wiki/Particle\\_swarm\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_swarm_optimization).



