

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa

Faculté des sciences exactes

Département d'informatique



## Mémoire fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en  
informatique

Option : Administration et sécurité des réseaux informatiques

Thème :

Amélioration et simulation du protocole  
de routage AORP dans les réseaux de  
capteurs sans fil

**Présenté par :**

GUETTAF Dihia

HADJAL Lydia

**Devant le jury composé de :**

Président: **Mr** NAFI Mohammed

Promotrice : **Melle** BOUADEM Nassima

Co-promoteur : **Mr** ACHROUFENE Achour

Examinatrice : **Mlle** BEN BOUDAUD Lynda

**Promotion** 2015-2016

## Dédicaces

*Nous dédions ce modeste travail à:*

*A nos parents pour tout leurs amour et leurs soutien pour réaliser ce  
travail;*

*A nos frères et sœurs;*

*A nos familles sans exception;*

*A nos enseignants;*

*A tous nos amis et camarades et tous ceux qui nous ont aidé de près  
et de loin;*

*Dihia, Lydia.*

## Remerciements

Nous tenons à remercier le dieu tout puissant de nous avoir accordé le courage, la patience, et la volonté jusqu'à l'acheminement de ce modeste travail.

Nous exprimons notre vive reconnaissance à notre promotrice **Melle BOUADEM Nassima** et notre co-promoteur **Mr ACHROUFENE Achour** pour leurs précieux conseils, leurs orientations, leur disponibilité et tous le temps qu'ils nous ont consacré pour la réalisation de notre mémoire.

Nous tenons à remercier également tous nos collègues et tous nos enseignants du département informatique.

Enfin nous adressons nos plus sincère remerciements à nos parents, à toute nos familles et amis qui nous ont toujours soutenus et encouragés tout au long de notre travail.

Merci à toutes et à tous.

# Table des Matières

<b>Table des Matières</b>	<b>i</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des Tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Liste des Abréviations</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Généralités sur les réseaux . . . . .	3
1.2.1 Réseaux sans fil . . . . .	3
1.2.2.1 Réseaux avec infrastructure fixe préexistante (cel- lulaire) . . . . .	3
1.2.2.2 Réseaux sans infrastructure (Ad-hoc) . . . . .	4
1.3 Les réseaux de capteurs . . . . .	5
1.3.1 Définition . . . . .	5
1.3.2 Architecture de communication d'un réseau de capteur . . . . .	6
1.3.3 Architecture d'un nœud capteur . . . . .	7
1.3.3.1 L'unité d'acquisition . . . . .	8
1.3.3.2 L'unité de traitement . . . . .	8
1.3.3.3 L'unité de transmission . . . . .	8
1.3.3.4 L'unité d'énergie . . . . .	8
1.3.3.5 L'unité de contrôle d'énergie . . . . .	9
1.3.3.6 Système de localisation . . . . .	9
1.3.3.7 L'unité de mobilité . . . . .	9
1.3.3.8 Générateur d'énergie . . . . .	9
1.3.4 Classification des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	9
1.3.4.1 Selon la distance d'un nœud capteur à un nœud puits . . . . .	9
1.3.4.2 Selon Le mode d'acquisition et de livraison des données au puits . . . . .	9
1.3.4.3 Selon les capacités des nœuds du réseau . . . . .	10
1.3.5 Domaines d'application . . . . .	10
1.3.5.1 Applications militaires . . . . .	10

1.3.5.2	Applications de surveillance . . . . .	10
1.3.5.3	Applications domestiques . . . . .	11
1.3.5.4	Applications environnementales . . . . .	11
1.3.5.5	Applications agricoles . . . . .	11
1.3.5.6	Applications médicales . . . . .	11
1.3.6	Facteurs de Conception des réseaux de capteurs . . . . .	11
1.3.6.1	Adaptabilité . . . . .	11
1.3.6.2	Le coût de production . . . . .	11
1.3.6.3	Topologie du réseau . . . . .	12
1.3.6.4	Média de transmission . . . . .	12
1.3.6.5	La consommation d'énergie . . . . .	12
1.4	Comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad Hoc . . . . .	12
1.5	Conclusion . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Routage dans les RCSF</b>	<b>14</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	Protocole de routage . . . . .	15
2.2.1	Définition . . . . .	15
2.2.2	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs . . . . .	15
2.2.2.1	Classification selon la structure du réseau . . . . .	16
2.2.2.2	Classification selon leurs modes opératoires . . . . .	20
2.2.2.3	Classification selon la manière d'établissement de route . . . . .	21
2.3	Consommation d'énergie dans les RCSF . . . . .	23
2.3.1	Energie de capture . . . . .	23
2.3.2	Energie de traitement . . . . .	23
2.3.3	Energie de communication . . . . .	23
2.4	Problème de la consommation d'énergie . . . . .	24
2.4.1	Sources de surconsommation d'énergie . . . . .	25
2.4.1.1	Les collisions . . . . .	26
2.4.1.2	L'écoute à vide (idlelistening) . . . . .	26
2.4.1.3	Réception indésirable (overhearing) . . . . .	26
2.4.1.4	Non disponibilité du récepteur (overmitting) . . . . .	26
2.4.1.5	Les paquets de contrôle (overhead) . . . . .	26
2.4.2	Techniques de conservation de l'énergie . . . . .	26
2.4.2.1	optimisation radio . . . . .	27
2.4.2.2	Techniques du Duty-cycling . . . . .	27
2.4.2.3	Réduction de donnée . . . . .	28
2.4.2.4	Contrôle de topologie . . . . .	29
2.4.2.5	Routage efficace en énergie . . . . .	29
2.5	L'équilibrage de charge . . . . .	32
2.5.1	Le principe de l'équilibrage de charge . . . . .	32
2.5.2	Classification des stratégies d'équilibrage de charge . . . . .	32
2.5.2.1	L'équilibrage de charge local contre l'équilibrage de charge global . . . . .	32
2.5.2.2	L'équilibrage de charge centralisé et distribué . . . . .	32

2.5.2.3	La stratégie d'équilibrage de charge Expéditeur- initié ou récepteur-initié . . . . .	33
2.5.3	Equilibrage de charge dans les RCSFs . . . . .	33
2.6	Conclusion . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Proposition et simulation d'une solution de routage assurant l'équilibrage de charge dans les RCSF</b>	<b>36</b>
3.1	Introduction . . . . .	37
3.2	Motivation . . . . .	37
3.3	AORP . . . . .	37
3.3.1	l'idée de base . . . . .	37
3.3.2	Les opérations du protocole . . . . .	38
3.4	Etude critique de AORP . . . . .	40
3.5	Description de notre Approche . . . . .	40
3.6	Environnement de travail . . . . .	41
3.6.1	TinyOS . . . . .	41
3.6.2	Les outils de simulation TinyOs . . . . .	41
3.6.3	NesC (Network embedded system C) . . . . .	42
3.7	Les étapes de notre Simulation et ses résultats . . . . .	43
3.7.1	Modifications apportées à AORP . . . . .	43
3.7.2	Déroulement de la simulation . . . . .	46
3.8	Conclusion . . . . .	56
	<b>Conclusion générale</b>	<b>57</b>

## Liste des figures

1.1	Un réseau mobile avec infrastructure [3]. . . . .	4
1.2	Un réseau sans infrastructure (Ah doc)[3]. . . . .	5
1.3	Exemple d'un réseau de capteur [7]. . . . .	6
1.4	Architecture de communication d'un réseau de capteurs [8]. . . . .	7
1.5	Composants d'un capteur [10]. . . . .	8
2.1	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs. . . . .	16
2.2	Classification selon la structure du réseau. . . . .	17
2.3	Le routage à plat[9]. . . . .	17
2.4	Le routage hiérarchiques[9]. . . . .	18
2.5	Le routage basé sur la localisation géographique[22]. . . . .	19
2.6	Classification selon leurs modes opératoires. . . . .	20
2.7	Classification selon la manière d'établissement de route. . . . .	22
2.8	La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [3]. . . . .	24
2.9	Les techniques de conservation de l'énergie. . . . .	31
2.10	Équilibrage de charge centralisée [39]. . . . .	33
2.11	Exemple de structure de réseau en cluster [40]. . . . .	34
3.1	Topologie de 10 nœuds . . . . .	46
3.2	L'énergie moyenne restante. . . . .	47
3.3	l'énergie consommée par AORP dans la simulation 1. . . . .	48
3.4	l'énergie consommée par AORP amélioré dans la simulation 1 . . . . .	49
3.5	Topologie de 16 nœuds. . . . .	50
3.6	La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds proche de la station de base pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites. . . . .	51
3.7	l'énergie consommée par AORP dans la simulation 1. . . . .	52
3.8	l'énergie consommée par AORP amélioré dans la simulation 1. . . . .	52
3.9	Topologie de 30 nœuds . . . . .	53
3.10	L'énergie moyenne restante. . . . .	54
3.11	l'énergie consommée par AORP dans la simulation 1. . . . .	55
3.12	l'énergie consommée par AORP amélioré dans la simulation 1. . . . .	55

# Liste des tableaux

3.1	L'entête d'un message d'initialisation AORP. . . . .	38
3.2	L'entête d'un message de données AORP. . . . .	39
3.3	La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites. . . . .	47
3.4	l'énergie restante des nœuds 1, 2, 8 à la 3 ème simulation dans les deux protocoles. . . . .	48
3.5	La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites. . . . .	50
3.6	La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites. . . . .	54

## Liste des Abréviations

AOMDV	Ad-hoc <b>O</b> n-demand <b>M</b> ultipath <b>D</b> istance <b>V</b> ector
AORP	<b>A</b> daptative <b>O</b> ptimized energy efficient <b>R</b> outing <b>P</b> rotocol
CAN	<b>C</b> onvertisseur <b>A</b> nalogique <b>N</b> umérique
CN	<b>C</b> entral <b>N</b> ode
CR	<b>C</b> ognitive <b>R</b> adio
DREAM	<b>D</b> istance <b>R</b> outing <b>E</b> ffect <b>A</b> lgorithm for <b>M</b> obility
EAR	<b>E</b> nergy <b>A</b> ware <b>R</b> outing
GPS	<b>G</b> lobal <b>P</b> osition <b>S</b> ystem
GSR	<b>G</b> lobal <b>S</b> tate <b>R</b> outing
LEACH	<b>L</b> ow- <b>E</b> nergy <b>A</b> daptive <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
MAC	<b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
MCFA	<b>M</b> inimum <b>C</b> ost <b>F</b> orwording <b>A</b> lgorithm
MCU	<b>M</b> icro <b>C</b> ontroller <b>U</b> nit
QDS	<b>Q</b> ualité <b>D</b> e <b>S</b> ervice
RCSF	<b>R</b> éseau de <b>C</b> apteurs <b>S</b> ans <b>F</b> il
SB	<b>S</b> tation de <b>B</b> ase
SN	<b>S</b> lave <b>N</b> ode
SPIN	<b>S</b> ensor <b>P</b> rotocol for <b>I</b> nformation via <b>N</b> egotiation
TDMA	<b>T</b> ime de <b>D</b> iviseur de <b>M</b> ultiple de <b>A</b> ccess
UM	<b>U</b> nité <b>M</b> obile
WSN	<b>W</b> ireless <b>S</b> ensor <b>N</b> etwork
ZRP	<b>Z</b> one <b>R</b> outing <b>P</b> rotocol

## Introduction générale

Les progrès récents dans le domaine des réseaux sans fil ont conduit à la mise en œuvre d'une nouvelle technologie nommée réseaux de capteurs, Cette technologie est basée sur des petits dispositifs appelés nœuds capteurs, qui peuvent être placés presque dans n'importe quel endroits et surtout ils sont utiles dans les endroits inaccessibles.

Les nœuds capteurs permettent de capturer, traiter et de communiquer les données vers la station de base ce qui nécessite de trouver un chemin de routage sur lequel ces données seront acheminées, pour cela plusieurs approches de routage ont été proposés. Étant donné que le routage est un facteur déterminant dans la gestion économique d'énergie.

Un capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants à savoir l'unité de capture, l'unité de traitement et l'unité de communication. Cependant, en raison de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Pour augmenter la durée de vie réseau, le capteur doit économiser au maximum son énergie car il influence fortement sur la durée de vie du réseau tout entier, pour cela plusieurs techniques ont été proposées afin de conserver l'énergie du capteur, et parmi ces techniques, la technique d'équilibrage de charge qui permet de diviser la charge de travail équitablement entre les différents nœuds.

Les réseaux de capteurs sont utilisés dans plusieurs domaines à savoir : le domaine militaire, médicale, agricole, domestique, etc.

Notre travail consiste à améliorer le protocole de routage AORP (an Adaptive Optimized energy efficient Routing Protocol for WSNs) qui se base sur la technique d'équilibrage de charge, son principe est de choisir le nœud voisin ayant le cout minimal.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres, il est organisé comme suit:

Le premier chapitre décrit un ensemble de généralités sur les réseaux Ad hoc et les réseaux de capteurs sans fil.

Le deuxième est consacré, en premier lieu, pour les différentes approches de routage ainsi que les problèmes de consommation d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil, et en deuxième lieu, pour les différentes techniques de conservation d'énergie ainsi que le principe de la technique d'équilibrage de charge.

Le troisième chapitre est dédié à la description détaillée du protocole AORP. Cette étude a permis de tirer les inconvénients de ce protocole, à partir desquels nous avons proposé une version améliorée. Dans le dernier chapitre, nous présentons dans un premier lieu notre plateforme de simulation tinyos ainsi que le langage Nes C, et en deuxième lieu nous présentons les résultats de notre simulation.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion et par plusieurs perspectives de recherche dans le domaine en question.

# 1

## Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

## 1.1 Introduction

La nécessité de surveiller et de contrôler l'environnement a conduit à la création d'une nouvelle technologie dans le domaine de la communication sans fil. Cette technologie est basée sur des petits dispositifs nommés nœuds capteurs, ces derniers sont équipés des moyens qui leurs permettent de récolter et de traiter des informations environnementales puis les transmettent via les ondes radio vers une ou plusieurs stations de base. Ce type de réseau est appelé: réseau de capteurs sans fil.

Dans ce premier chapitre nous définissons tout d'abord un réseau informatique, puis nous présentons brièvement les réseaux sans fil. Ensuite, nous donnons les principales généralités sur les réseaux de capteur sans fil à savoir leurs caractéristiques, leurs architectures et leurs domaines d'application.

## 1.2 Généralités sur les réseaux

Un réseau est un ensemble d'éléments interconnectés dans le but d'échanger des informations. Les éléments raccordées sont des machines délivrant des informations (serveurs) ou bien des machines qui reçoivent ou émettent des informations (terminaux), telles que des ordinateurs et les périphériques, par exemple des terminaux bureautiques comme imprimantes, scanners, etc. Un réseau peut également être constitué d'un ensemble de réseaux interconnecté, comme c'est le cas d'Internet. Souvent, Il est organisé sur une infrastructure de communication qui peut être filaire ou radio. Sur cette dernière vont circuler divers flux d'information [1]: données informatiques, vidéo, données transmis par capteur, etc .

### 1.2.1 Réseaux sans fil

Un réseau sans fil (en anglais Wireless Network), est comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux périphériques (ordinateur, PDA, imprimante, router, etc.) peuvent communiquer sans liaison filaire[2].

Un réseau sans fil offre à ses utilisateurs un accès à l'information indépendamment de leurs positions géographiques, en utilisant des liaisons radios [3]. Il peut être classé en deux catégories:

#### 1.2.2.1 Réseau avec infrastructure fixe préexistante (cellulaire)

Un réseau avec infrastructure est appelé aussi réseau avec point d'accès. Dans ce modèle, nous distinguons deux ensembles d'entités distinctes, à savoir les sites fixes d'un réseau de communication filaire classique (wired network) et les sites mobiles (wireless network) [4]. La communication entre deux sites ou unités mobiles (UM) localisés dans une zone géographique limitée (cellule) passe nécessairement par une station fixe appelée station de base (SB) [3]. Chaque station de base correspond à une cellule, et ces sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire. Une UM peut aussi communiquer avec des UMs qui sont localisées dans une autre cellule à travers la SB à laquelle elle est directement rattachée [4]. La figure 1.1 représente un réseau mobile avec infrastructure:

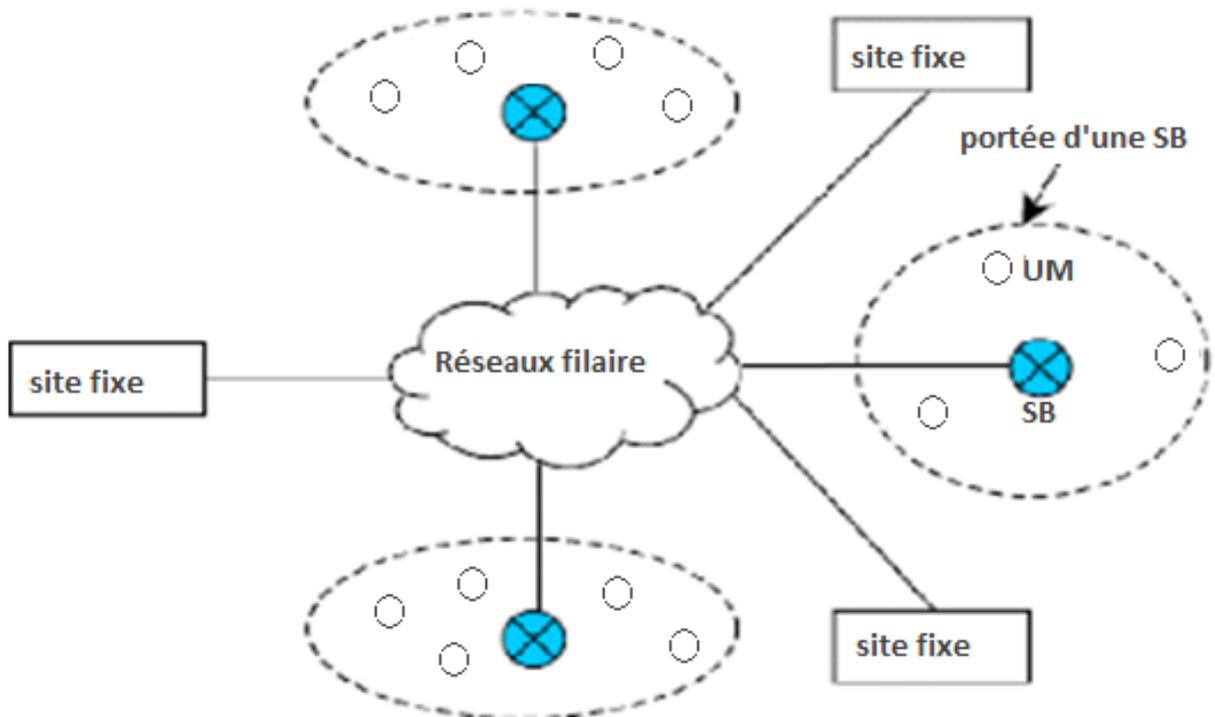


Figure 1.1: Un réseau mobile avec infrastructure [3].

#### 1.2.2.2 Réseau sans infrastructure (Ad-hoc)

Dans le modèle de réseau sans infrastructure préexistante, tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil. L'absence de la station de base oblige les UMs à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau [4].

La figure 1.2 représente un réseau sans infrastructure:

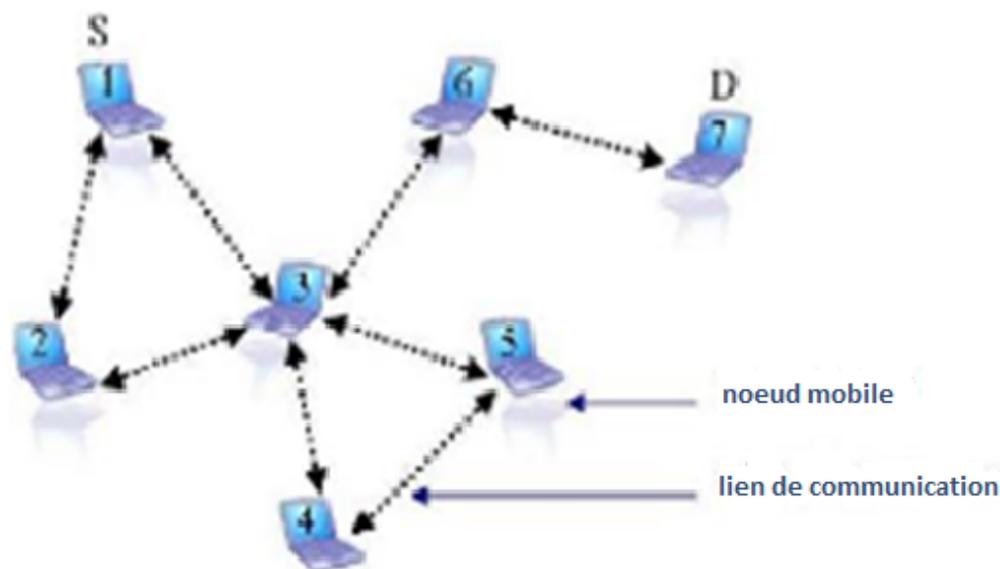


Figure 1.2: Un réseau sans infrastructure (Ah doc)[3].

## 1.3 Les réseaux de capteurs

### 1.3.1 Définition

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des types particuliers de réseaux Ad-hoc [5]. Ils sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs et un ou plusieurs nœuds de puits (stations de base). Les nœuds de capteurs sont déployés à l'intérieur de la zone d'intérêt pour collecter des informations utiles provenant de l'environnement et les envoyer à une station de base située généralement à l'extrémité de la zone d'intérêt.

Le rôle de la station de base est de rassembler les informations envoyées par les nœuds de capteurs et de les envoyer à l'utilisateur (nœud de commande), et éventuellement envoyer des requêtes vers les nœuds capteurs. En règle générale, la station de base est beaucoup plus puissante en termes de ressources que les nœuds capteurs [6]. Les capteurs sont des objets limités en termes de bande passante, de puissance de calcul, de mémoire disponible et d'énergie embarquée. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée, ils sont dispersés aléatoirement [5].

La figure 1.3 représente un exemple d'un réseau de capteur:

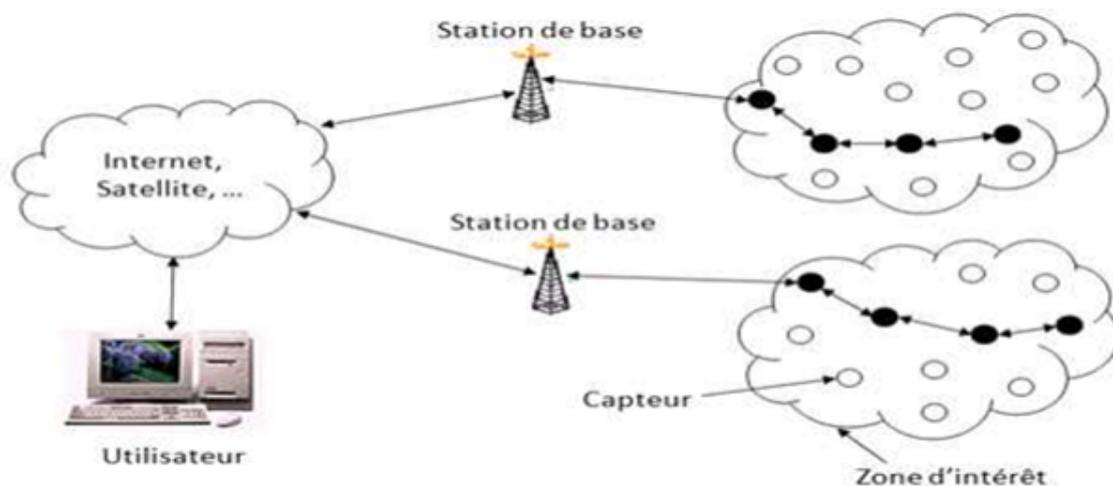


Figure 1.3: Exemple d'un réseau de capteur [7].

### 1.3.2 Architecture de communication d'un réseau de capteur

Après le déploiement des nœuds capteurs dans une zone de surveillance, ceux-ci commencent par la découverte de leurs voisins afin de construire la topologie de communication. Ainsi, ils deviennent prêts pour accomplir les tâches que leur sont affectées.

Selon une communication multi-sauts, les capteurs sont chargés de collecter des données puis les router vers un nœud particulier appelé nœud puits. Ce dernier analyse ces données et transmet à son tour l'information collectée à l'utilisateur via internet ou bien satellite. Comme l'indique la figure ci-dessous l'ensemble de nœuds construisant le RCSF est considéré comme étant un réseau d'acquisition de données. Par contre, le réseau de distribution de données est composé des utilisateurs, et du réseau de communication : l'internet, et les satellites [8].

La figure 1.4 représente l'architecture de communication d'un réseau de capteurs:

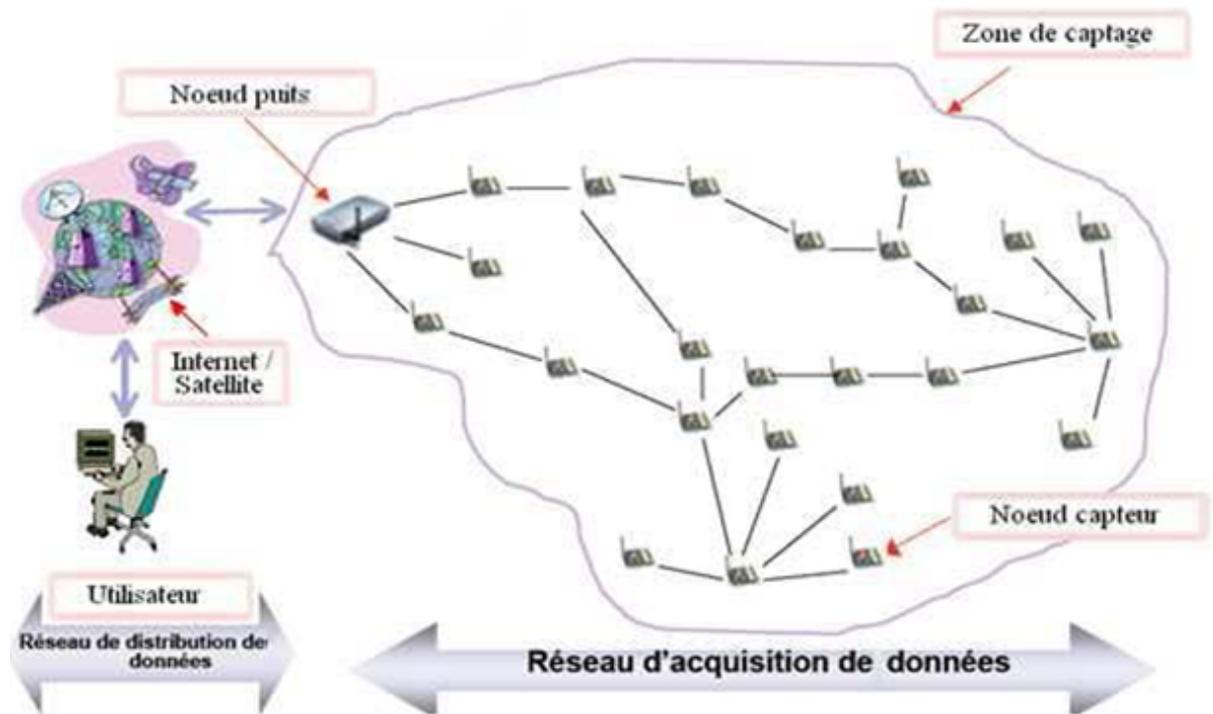


Figure 1.4: Architecture de communication d'un réseau de capteurs [8].

### 1.3.3 Architecture d'un nœud capteur

Un nœud capteur est constitué de quatre unités principales: de capture, de traitement, de transmission (émission /réception), et de contrôle d'énergie. Et selon le domaine d'application on y trouve d'autres unités additionnelles (système de localisation, générateur d'énergie, mobilisateur, etc.) [9].

La figure 1.5 représente l'architecture d'un nœud capteur:

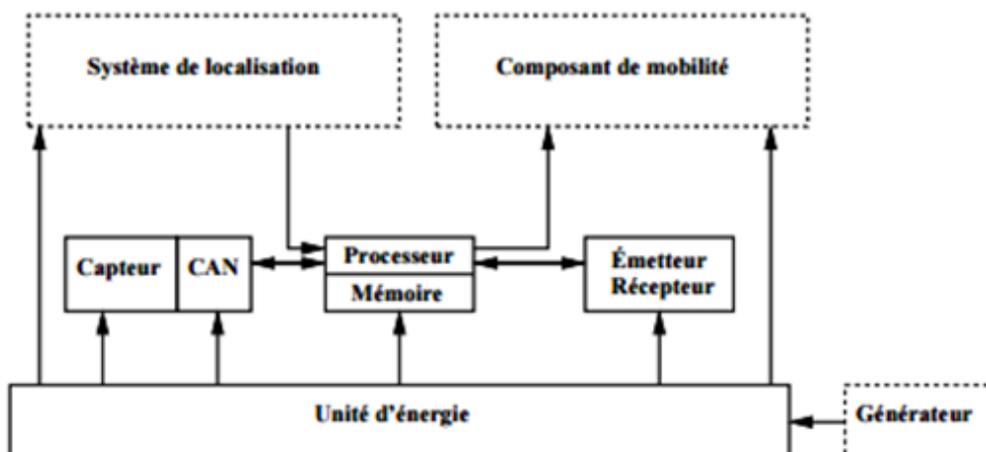


Figure 1.5: Composants d'un capteur [10].

### 1.3.3.1 L'unité d'acquisition

Elle est composée d'un ou plusieurs capteurs qui vont obtenir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique (CAN) qui va convertir l'information relevée et la transmettre à l'unité de traitement.

### 1.3.3.2 L'unité de traitement

Elle est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission.

### 1.3.3.3 L'unité de transmission

Elle est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio [10].

### 1.3.3.4 L'unité d'énergie

C'est la batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. L'énergie limitée des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les RCSF.

### 1.3.3.5 L'unité de contrôle d'énergie

Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie de capteur.

### 1.3.3.6 Système de localisation

Certaines applications ont besoin de connaître l'emplacement du capteur, pour cette raison, le capteur doit avoir un système de localisation tel qu'un GPS.

### 1.3.3.7 L'unité de mobilité

Dans les réseaux de capteurs mobiles les nœuds doivent se déplacer, donc l'unité de mobilité est appelée si le nœud capteur doit se déplacer pour accomplir la requête à traiter.

### 1.3.3.8 Générateur d'énergie

Il récupère l'énergie de l'environnement extérieur tel que l'énergie solaire puisque le capteur se laisse pendant des mois et même durant des années sans l'intervention humaine [9].

## 1.3.4 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSFs peuvent être classifiés en différents catégories basés sur plusieurs critères [9]:

### 1.3.4.1 Selon la distance d'un nœud capteur à un nœud puits

Le RCSF peut être un réseau à un seul saut (single-hop) ou à multi-sauts (multi-hop). Dans la première catégorie tous les nœuds capteurs transmettent leurs données directement vers un nœud puits. Tandis que dans la deuxième catégorie les nœuds peuvent envoyer des données à un nœud puits via des nœuds intermédiaires. Dans ce cas, les nœuds intermédiaires exécutent une fonction de routage.

### 1.3.4.2 Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison de données au puits dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être [9]:

- a. **Modèle continu:** dans ce modèle les nœuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) envoyer les données capturées au nœud puits. Le type d'application visé concerne les applications de surveillance ou le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée.
- b. **Modèle orienté événements:** les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un événement qui se produit.

- c. **Modèle orienté requêtes:** dans ce modèle les capteurs mesurent des grandeurs physiques comme la température par exemple. Après, ils stockent ces mesures dans leur mémoires. Ensuite, ils les envoient seulement lorsqu'ils reçoivent des requêtes de la station de base.
- d. **Le modèle hybride:** est une combinaison des trois modèles précédents.

#### 1.3.4.3 Selon les capacités des nœuds du réseau

Dans cette classe, on distingue les réseaux homogènes des hétérogènes. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie de réseau. L'avantage d'un tel réseau est que ces nœuds sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter les tâches plus complexes. Son inconvénient est qu'il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau aura un code (programme) propre à lui. Ce qui augmente le coût de développement [9].

### 1.3.5 Domaines d'application

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs et l'évolution des supports de communication sans fil ont élargi les champs d'application des réseaux de capteurs. Parmi lesquels, nous citons:

#### 1.3.5.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent faire partie intégrante du commandement militaire. Ce dernier inclue le contrôle, la communication, le renseignement, la surveillance et les systèmes de ciblage. De même, un réseau de capteurs peut être déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations). Les caractéristiques de déploiement rapide, tolérance aux pannes et d'auto-organisation des réseaux de capteurs font d'eux une technique de détection très prometteuse pour des militaires [11].

#### 1.3.5.2 Applications de surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure [12].

### 1.3.5.3 Applications domestiques

En plaçant des capteurs sur le plafond ou dans le mur, on peut économiser l'énergie. Celle-ci peut être assurée en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation et/ou la présence des personnes, ou la température ambiante.

### 1.3.5.4 Applications environnementales

elle concerne la surveillance de l'environnement. Ces applications sont diverses, on peut citer le suivi du mouvement des oiseaux, de petits animaux et les insectes. La surveillance des conditions environnementales qui affectent les cultures et le bétail, la surveillance de l'environnement en milieu marin, et la détection des incendies de forêt [11].

### 1.3.5.5 Applications agricoles

les réseaux de capteurs sans fil permettent l'irrigation et la fertilisation en plaçant des capteurs pour détecter l'humidité du sol des champs. En outre, l'élevage peut bénéficier de la fixation d'un capteur pour chaque vache par exemple afin de contrôler l'état de santé des animaux en vérifiant la température du corps [13].

### 1.3.5.6 Applications médicales

Dans ce domaine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain. Et cela grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers, etc). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que la tension artérielle, battements du cœur, à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière [12].

## 1.3.6 Facteurs de Conception des réseaux de capteurs

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil est influencée par plusieurs paramètres, parmi lesquels nous citons l'adaptabilité, la tolérance aux pannes, le coût de production, la topologie du réseau, les média de transmission et la consommation d'énergie.

### 1.3.6.1 Adaptabilité

Les réseaux de capteurs sont requis pour fonctionner en s'adaptant aux changements environnementaux que les capteurs contrôlent [14].

### 1.3.6.2 Le coût de production

Le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau. Si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait

pas rentable. Par conséquent, réduire le coût de production est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil [9].

### 1.3.6.3 Topologie du réseau

L'ajout de nouveaux capteurs sur la zone de captage ou la perte d'un ou plusieurs nœuds capteurs du réseau peut causer une instabilité de la topologie du réseau [15].

### 1.3.6.4 Média de transmission

Les nœuds communicants sont reliés sans fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique [9].

### 1.3.6.5 La consommation d'énergie

Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées. De plus, dans certaines applications ces nœuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie. Par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseau qui consomment le minimum d'énergie [16].

## 1.4 Comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad Hoc

Un RCSF appartient à la famille des réseaux ad hoc. Cependant, on peut noter quelques différences majeures [17]:

- En général, le nombre de nœuds dans un RCSF est beaucoup plus élevé par rapport à celui d'un réseau ad-hoc.
- Les nœuds capteurs sont déployés en grand nombre pour prévenir d'éventuelles défaillances.
- La communication entre les nœuds capteurs repose en général sur la diffusion, alors que la plupart des réseaux ad hoc utilisent une communication point à point.
- Les nœuds capteurs ont des ressources limitées [18](puissance de transmission, de calcul, autonomie d'énergie électrique, capacité mémoire) .

## **1.5 Conclusion**

La technologie des réseaux de capteurs est une sous classe des réseaux ad hoc, elle est basée sur des petits dispositifs nommés capteurs. Cette technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ses applications dans plusieurs domaines de notre vie quotidienne, à savoir le domaine médical, environnemental, militaire etc.

Ce premier chapitre été consacré à présenter ce type de réseaux, leurs architecture, leurs facteurs de conception et de réalisation.

# 2

## Routage dans les RCSF

## 2.1 Introduction

La nécessité de surveiller et de contrôler l'environnement a conduit à la création d'une nouvelle technologie dans le domaine de la communication sans fil.

Comme nous avons souligné dans le chapitre précédant, le rôle d'un réseau de capteur est de surveiller un ou plusieurs phénomènes. Cet objectif est assuré en utilisant des capteurs déployés dans une zone géographique bien précise souvent dite zone d'intérêt. Ces derniers servent à collecter des informations puis les transmettent à la destination qui est la station de base sous forme de paquets. Par conséquent, cela nécessite de trouver un chemin de routage sur lequel seront acheminés les paquets de la source vers la destination. Cela est l'objectif principal des protocoles de routage.

La problématique majeure dans les RCSFs est la maîtrise de l'énergie consommée par chaque nœud capteur, ce qui nécessite l'optimisation de cette dernière pour allonger la durée de vie du réseau. Cette problématique a été largement étudiée, et plusieurs techniques ont été utilisées afin d'assurer l'efficacité énergétique. Parmi ces dernières la technique d'équilibrage de charge est très avantageuse grâce à sa capacité de partager de trafic sur tous les nœuds.

Dans ce chapitre nous allons décrire en premier lieu, les différentes approches de routage dans les RCSFs puis présenter quelques protocoles pour chaque approche. Dans un deuxième lieu, nous allons exposer les protocoles assurant l'efficacité énergétique en employant la technique de l'équilibrage de charge.

## 2.2 Protocole de routage

### 2.2.1 Définition

Le routage consiste à trouver un chemin pour envoyer le message de la source à la destination. Dans le cadre des RCSFs, il doit être efficace en énergie. Pour cela, il faut bien sûr être capable de trouver un chemin qui ne consomme pas trop d'énergie, qui ne soit pas trop long également [19].

### 2.2.2 Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

Pour permettre la communication dans un réseau de capteurs, employer un protocole de routage basé sur la communication multi-sauts est nécessaire. Cependant, il existe une multitude de protocoles dont le principe de fonctionnement diffère selon la philosophie de l'approche à laquelle ils appartiennent. Ces approches peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau, les objectifs des protocoles et l'établissement de route [3].

La figure 2.1 représente les approches de routage dans les réseaux de capteurs:

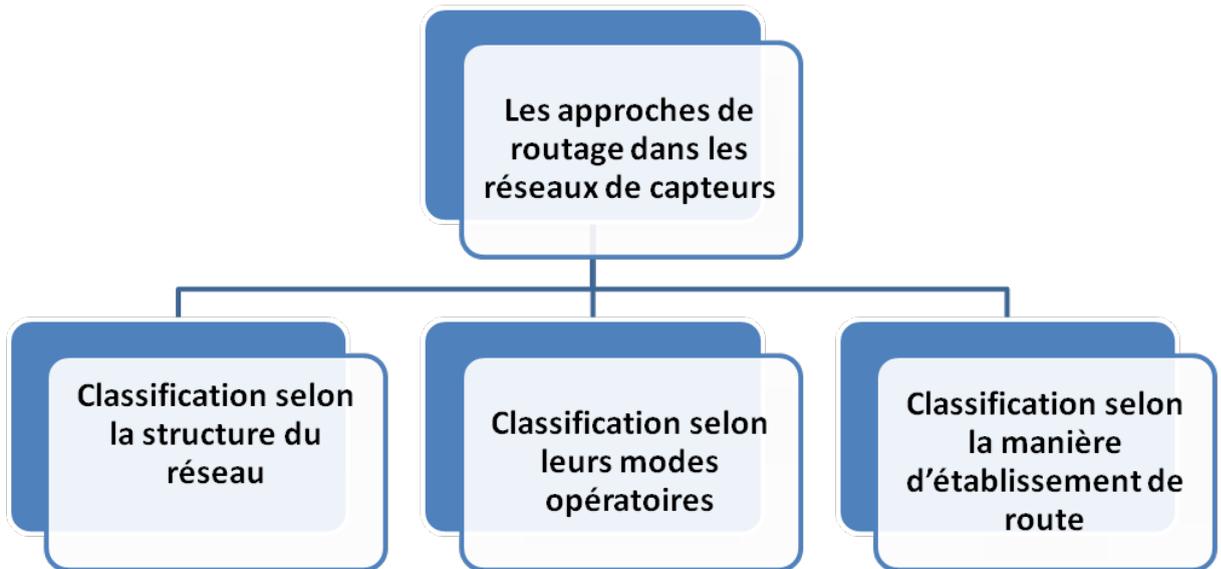


Figure 2.1: Les approches de routage dans les réseaux de capteurs.

### 2.2.2.1 Classification selon la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories[3].

La figure 2.2 représente la classification selon la structure du réseau:

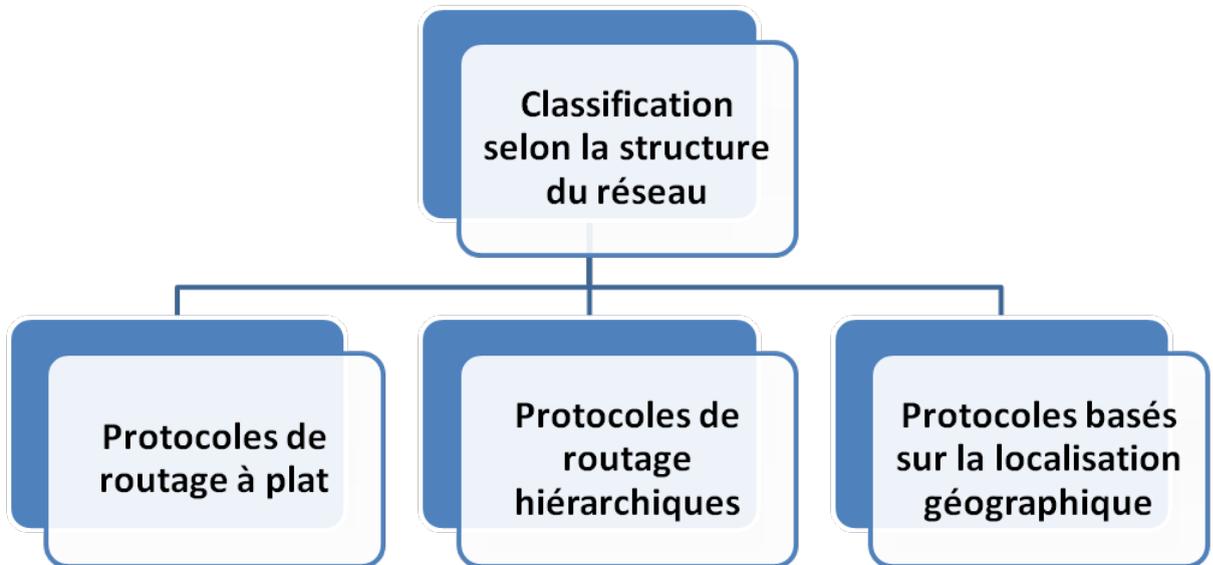


Figure 2.2: Classification selon la structure du réseau.

**a. Protocoles de routage à plat (Flat based routing)**

Un réseau de capteurs sans fil plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et des fonctions, excepté la SB (dite Sink) [20].

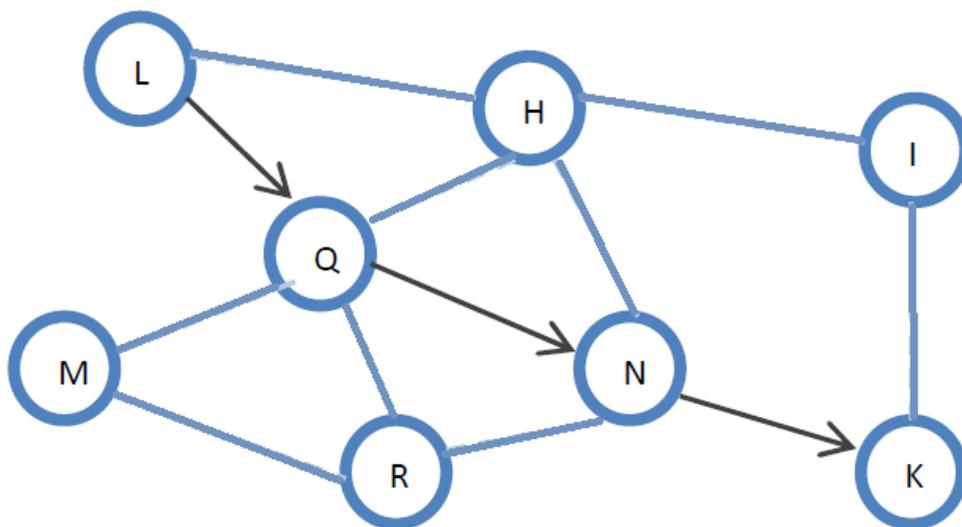


Figure 2.3: Le routage à plat[9].

Nous présentons dans ce qui suit quelques protocoles qui sont fondés sur cette

architecture:

- **Routage basé énergie (Energy Aware Routing (EAR))** Pour augmenter la durée de vie du réseau, un ensemble de chemins est utilisé afin d'en choisir un tout en utilisant une fonction probabiliste. Cette dernière dépend de la consommation d'énergie sur chaque chemin. Cette approche est basée sur l'argument de taille suivant: Si on utilise toujours le chemin de faible consommation d'énergie, ceci aboutira à une diminution des ressources d'énergie des nœuds appartenant à ce chemin. Il risque alors de devenir impraticable. Pour éviter cette situation et accroître la durée de vie du réseau, il est alors préférable d'acheminer les données sur plusieurs chemins avec une certaine probabilité.

- **L'algorithme du coût minimal d'envoi (Minimum Cost Forwarding Algorithm(MCFA))** Cet algorithme considère que la direction du routage est toujours connue, chaque nœud doit connaître le chemin de moindre coût qui le relie au puits. Il maintient le moindre coût estimé le reliant au puits [21].

#### b. Protocoles de routage hiérarchiques (hierarchic based routing)

Ces protocoles fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds du réseau. Certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Un nœud peut être, par exemple, une passerelle pour un ensemble de nœuds. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination qui lui est directement attaché [22].

La figure 2.4 représente le routage hiérarchiques:

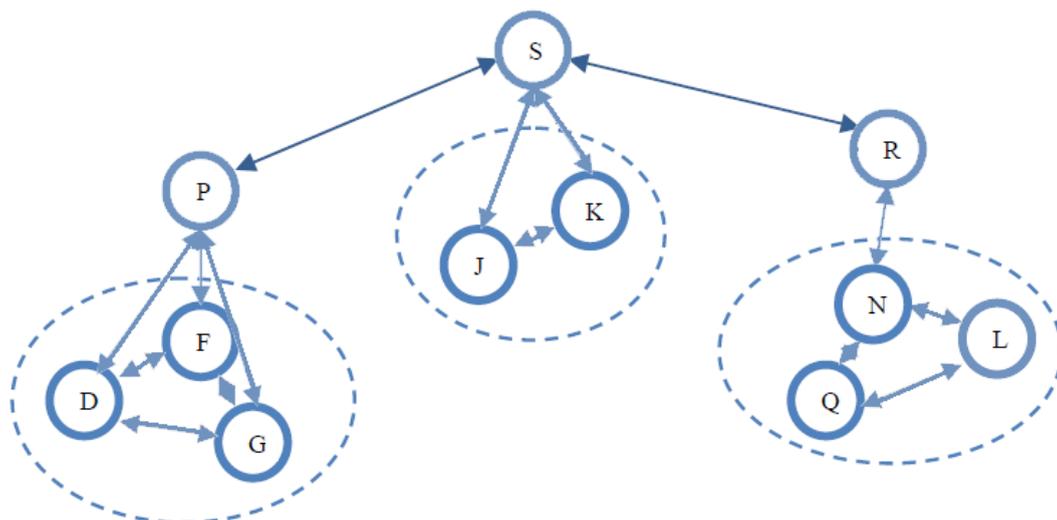


Figure 2.4: Le routage hiérarchiques[9].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, nous citons:

- **LEACH** choisit aléatoirement les nœuds cluster-heads et attribue ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin (c'est-à-dire tourniquet). L'objectif est de garantir une dissipation équitable d'énergie entre les nœuds. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les nœuds membres qui appartiennent à leur propre cluster, puis envoient un paquet agrégé à la station de base [23].

### c. Protocoles basés sur la localisation géographique (localisation based routing):

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds. Les pré-requis pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc sont [22]:

- Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS (Global Position System), soit un système logiciel comme un protocole de localisation.
- Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation doit être utilisé.

La figure 2.5 représente le routage basé sur la localisation géographique:

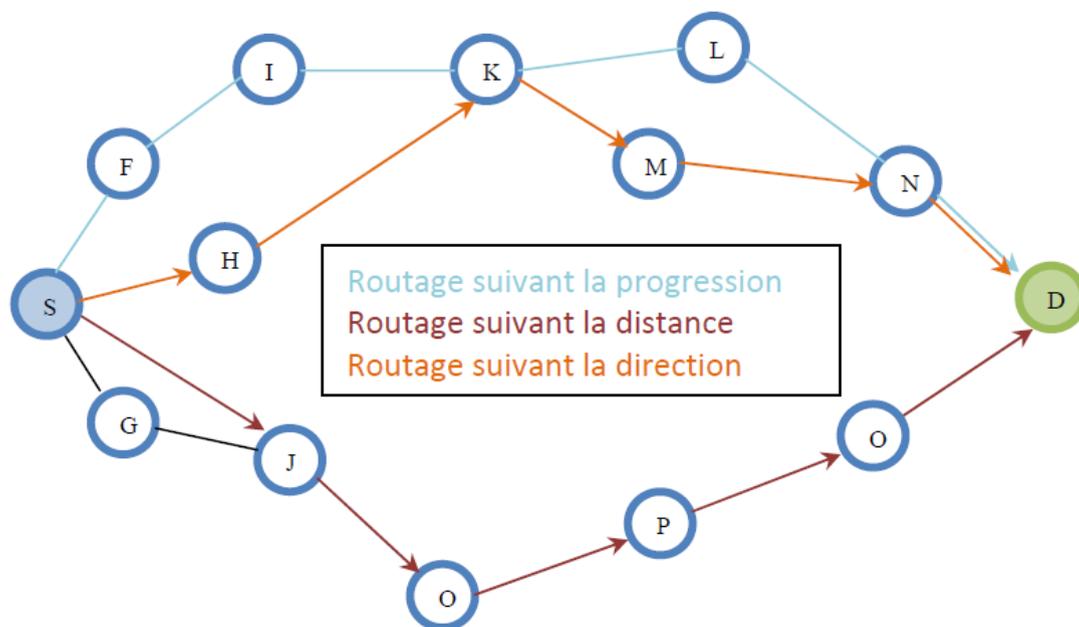


Figure 2.5: Le routage basé sur la localisation géographique[22].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, nous citons:

- **Le protocole DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)** Dans le protocole DREAM chaque nœud maintient une table de localisation qui contient les coordonnées géographiques de toutes les destinations obtenues par un système de positionnement comme GPS. L'utilisation de ces informations de localisation permet de calculer la direction de chaque destination ainsi que la distance vers chacune d'elles [24].

### 2.2.2.2 Classification selon les modes opératoires

Nous allons maintenant examiner les protocoles de routage sous l'angle de leurs modes opératoires[3].

La figure 2.6 représente la classification selon leurs modes opératoires:

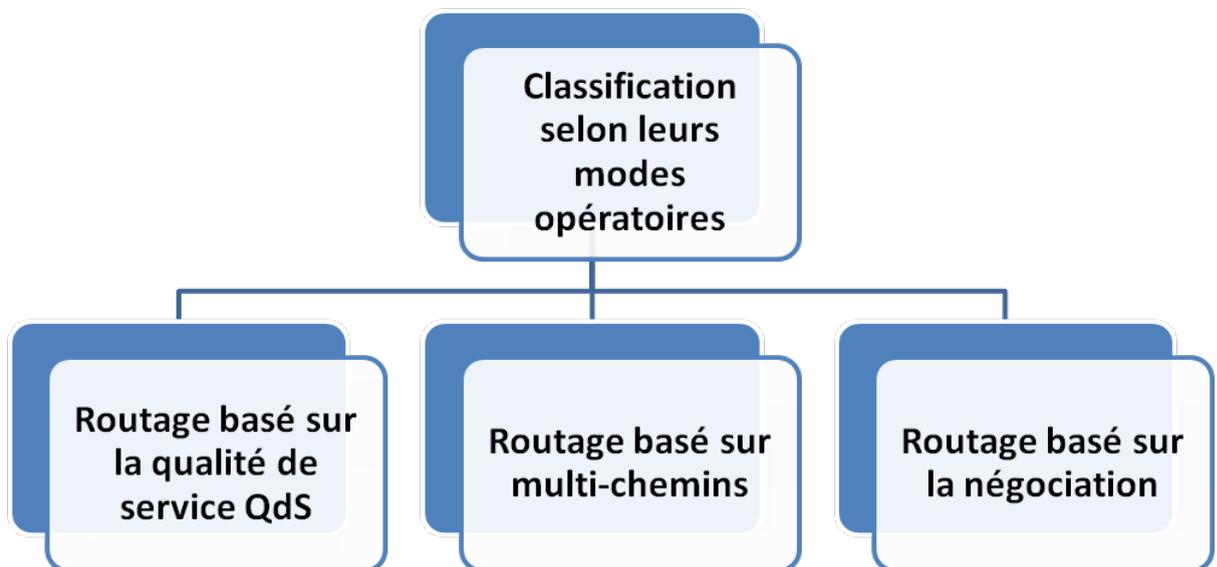


Figure 2.6: Classification selon leurs modes opératoires.

#### a. Routage basé sur la qualité de service QoS

Dans les protocoles basés sur la qualité de service, un équilibre entre la consommation d'énergie et la qualité des données doit être trouvé. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques qui quantifient la qualité de service (délai (retard), énergie, largeur de bande, etc) lorsqu'il délivre les données à la station de base [21].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, nous citons:

- **SPEED** est un protocole de routage basé sur la QoS qui garantit le temps réel et le routage de bout en bout. Il estime le délai sur chaque saut en calculant le délai aller-rotateur. Après avoir déterminé le délai, le prochain saut est choisi parmi les voisins qui sont plus proche de la destination [9].

### b. Routage basé sur multi-chemins

Dans cette catégorie, protocoles qui utilisent des chemins multiples, au lieu d'un seul chemin, pour améliorer la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité d'existence d'un chemin alternatif entre la source et la destination lorsque le chemin primaire a échoué [21].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, on cite:

- **Le protocole AOMDV (Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector protocol)** permet la découverte de plusieurs chemins sans boucles et lien-disjoints. Pour garder trace de plusieurs chemins, à chaque destination est associée une liste de sauts prochains avec le nombre de sauts correspondants. Pour chaque destination, chaque nœud maintient le "nombre de saut annoncé" qui est définie comme le maximum des nombres de sauts de tous les chemins qu'il maintient [24].

### c. Routage basé sur la négociation

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés META-DATA. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données [22].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, on cite:

- **Le protocole SPIN (SensorProtocols for Information via Negotiation)** est basé sur l'idée que les nœuds capteurs opèrent plus efficacement et conservent l'énergie en envoyant des données qui décrivent les données des capteurs au lieu d'envoyer des données entières, à moins que les données entières ne soient explicitement demandées [9].

#### 2.2.2.3 Classification selon la manière d'établissement de route

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage nous distinguons trois catégories de protocoles de routages: protocoles proactifs, réactifs ou hybrides [3].

La figure 2.7 représente la classification selon la manière d'établissement de route:

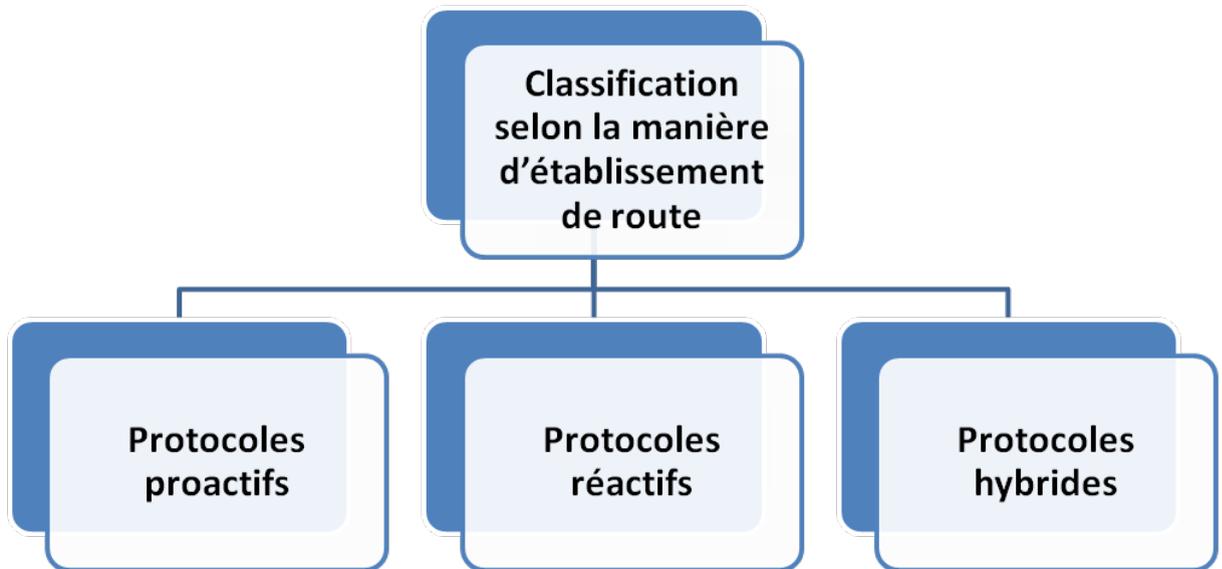


Figure 2.7: Classification selon la manière d'établissement de route.

#### a. Protocoles proactifs

Le fonctionnement des protocoles proactifs repose sur l'établissement des routes à l'avance. Cela signifie que les routes sont établies avant qu'il y ait demande de transmission. La maintenance des routes est assurée par l'échange périodique d'informations de routage entre les nœuds [25].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, on cite:

- **Le protocole GSR (Global State Routing)** dans GSR, chaque nœud maintient une table de topologie, une liste de voisins, une table de routage et une table de distances. Pour le calcul des chemins, un algorithme du plus court chemin comme celui de Dijkstra est utilisé mais modifié afin de construire la table de routage et la table de distances en parallèle avec le calcul des plus courts chemins [24].

#### b. Protocoles réactifs

Le routage réactif, quant à lui, s'appuie sur l'établissement des routes à la demande. Une route n'est calculée que si c'est nécessaire à la communication entre deux nœuds. La durée d'obtention d'une route est souvent plus longue car la recherche d'un chemin vers la destination commence uniquement lorsque la source veut transmettre des données.

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, nous citons:

- **DSR (Dynamic Source Routing)** comme son nom l'indique, DSR est un protocole de routage initié par la source. L'émetteur des données doit fournir la

route (la liste des nœuds à traverser) nécessaire pour atteindre le destinataire. Le chemin complet entre la source et la destination est présent dans l'en-tête de chaque paquet de donnée. Ainsi, les nœuds intermédiaires relaient le paquet selon la route indiquée [25].

### c. Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux idées: celle des protocoles proactifs et celle des protocoles réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour avoir des informations sur les voisins les plus proches (au maximum les voisins à deux sauts). Au-delà de cette zone prédéfinie, le protocole hybride fait appel aux techniques des protocoles réactifs pour chercher des routes [26].

Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, on cite :

- **ZRP(Zone Routing Protocol)** est un protocole de routage hybride combinant des mécanismes réactifs et proactifs. Chaque nœud possède une zone de routage, délimitée par un nombre de sauts à partir du nœud considéré (rayon de la zone). La zone de routage regroupe tous les nœuds dont la distance en nombre de sauts est inférieure ou égale au rayon de la zone [25].

## 2.3 Consommation d'énergie dans les RCSF

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes: la capture, le traitement et la communication de données [3].

### 2.3.1 Energie de capture

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes: échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde du capteur. En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud [27].

### 2.3.2 Energie de traitement

Le traitement inclut le contrôle des composants de capture et l'exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement de signaux sur les données collectées. le traitement est effectué par les microprocesseurs [28].

### 2.3.3 Energie de communication

L'énergie de communication se décline en quatre parties: l'énergie de réception, l'énergie de l'émission, l'énergie d'écoute et l'énergie de mise en veille [3]. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons

que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur[29].

La figure 2.8 représente la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil:

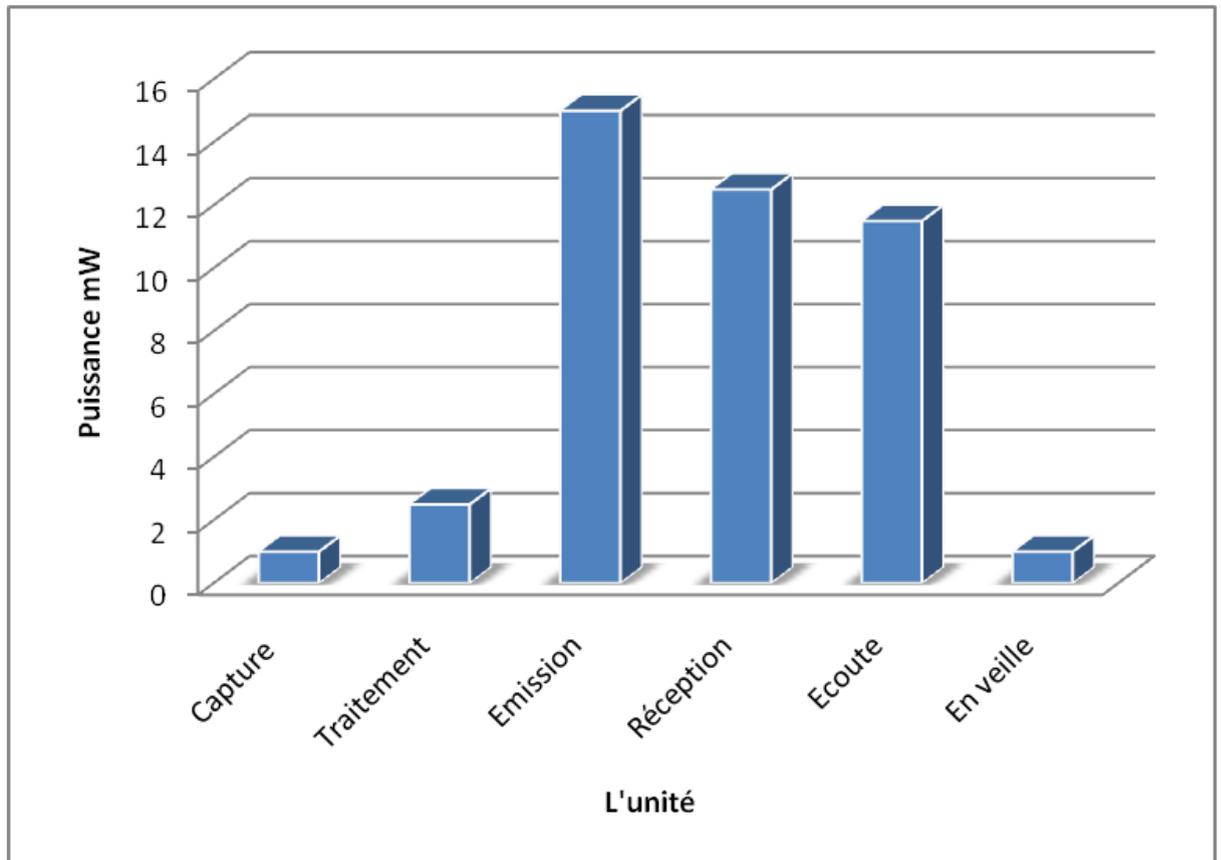


Figure 2.8: La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [3].

## 2.4 Problème de la consommation d'énergie

Les capteurs sans fils sont des éléments indépendants les uns des autres, comme leur nom l'indique. Par conséquent, ils doivent également disposer d'une alimentation autonome [19]. Comme ils sont des composant micro-électroniques, il ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie [30]. De plus, dans certaines applications, ces nœuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les RCSF. Il faut que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin d'augmenter la durée de vie du réseau [31]. Afin de concevoir des solutions efficaces en énergie, il est extrêmement important de faire d'abord une analyse des différents facteurs provoquant la dissipation de l'énergie d'un nœud capteur. Cette dissipation d'énergie se fait de manière générale selon plusieurs modes [32] :

- a. La radio:** opère dans quatre modes de fonctionnement: émission, réception, non actif «idle», et sommeil. Une observation importante dans le cas de la plupart des radios est que le mode « idle » induit une consommation d'énergie significative, presque égale à la consommation en mode réception. Ainsi, il est plus judicieux d'éteindre complètement la radio plutôt que de passer en mode « idle » quand l'on a ni à émettre ni à recevoir de données. Un autre facteur déterminant est que, le passage de la radio d'un mode à un autre engendre une dissipation d'énergie importante due à l'activité des circuits électroniques. Par exemple, quand la radio passe du mode sommeil au mode émission pour envoyer un paquet, une importante quantité d'énergie est consommée pour le démarrage de l'émetteur lui-même[33].
- b. MCU ( Micro Controller Unit):** Généralement les MCUs possèdent divers modes de fonctionnement: actif, « idle », et sommeil, à des fins de gestion d'énergie. Chaque mode est caractérisé par une quantité différente de consommation d'énergie. Toutefois, la transition entre les modes de fonctionnement implique un sur plus d'énergie et de latence. Ainsi, les niveaux de consommation d'énergie des différents modes, les coûts de transition entre les modes et encore le temps passé par le MCU dans chaque mode ont une incidence importante sur la consommation totale d'énergie d'un nœud capteur [32] .
- c. Le détecteur:** il y a plusieurs sources de consommation d'énergie par le module de détection, notamment l'échantillonnage et la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le conditionnement des signaux et la conversion analogique-numérique. Etant donné la diversité des capteurs, il n'y a pas de valeurs typiques de l'énergie consommée. En revanche, les capteurs passifs (température, sismiques, ...) consomment le plus souvent peu d'énergie par rapport aux autres composants du nœud-capteur. Notons que les capteurs actifs tels que les sonars, les capteurs d'images, etc. peuvent consommer beaucoup d'énergie [34].

### 2.4.1 Sources de surconsommation d'énergie

La surconsommation d'énergie est toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud-capteur. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses et peuvent être due à une ou plusieurs faits suivants. Le routage dans les réseaux de capteurs est un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau. La surconsommation concerne également la partie communication. En effet, cette dernière est sujette à plusieurs phénomènes qui surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et ont été recensés dans [35]:

#### 2.4.1.1 Les collisions

Elles sont la première source de perte d'énergie. Quand deux trames sont émises en même temps et se heurtent, elles deviennent inexploitable et doivent être abandonnées. Les retransmettre par la suite, consomme de l'énergie. Tous les protocoles MAC essaient à leur manière d'éviter les collisions[34].

#### 2.4.1.2 L'écoute à vide (idlelistening)

Un nœud dans l'état « idle » est prêt à recevoir un paquet, mais il n'est pas actuellement en train de recevoir quoi que ce soit. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode idle. Eteindre la radio est une solution, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester raisonnable [31].

#### 2.4.1.3 Réception indésirable (overhearing)

Cette situation se présente quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Ceci est dû essentiellement à la nature de la transmission radio qui est omni directement obligeant chacun des nœuds du voisinage à gaspiller de l'énergie en recevant cette radio[33].

#### 2.4.1.4 Non disponibilité du récepteur (overmitting)

Ce cas se produit lorsqu'un nœud capteur reçoit un paquet alors qu'il se trouve toujours en état en veille. Cette situation oblige l'émetteur à effectuer de nouvelles retransmissions afin de réussir sa transmission [33].

#### 2.4.1.5 Les paquets de contrôle (overhead)

L'envoi, la réception, et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie [34].

### 2.4.2 Techniques de conservation de l'énergie

La consommation d'énergie est un problème fondamental lorsque les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur de grands espaces, c'est à dire lorsqu'il est difficile voire impossible de remplacer les batteries des nœuds quand elles arrivent à l'épuisement. De ce fait, la durée de vie limitée des nœuds aura un impact sur la durée de vie du réseau tout entier. Augmenter la durée de vie du réseau sans augmenter la capacité des batteries signifie réduire la dépense d'énergie des nœuds. Parmi les techniques permettant de rendre les réseaux de capteurs sans fil moins gourmands en énergie, nous citons [36]:

### 2.4.2.1 Optimisation radio

Le module radio est le principal élément qui provoque l'épuisement de la batterie de nœuds de capteurs. Pour réduire la dissipation d'énergie due aux communications sans fil, les chercheurs ont essayé d'optimiser les paramètres radio tels que les systèmes de codage, des schémas de modulation, transmission de puissance et la direction de l'antenne.

#### a. Optimisation de modulation

A pour but de trouver les paramètres optimaux de modulation résultant de la consommation d'énergie minimale de la radio. Par exemple, l'épuisement de l'énergie est provoqué par la consommation d'énergie du circuit et de la consommation de puissance du signal transmis. Sur de courtes distances, la consommation du circuit est supérieure à la puissance d'émission que d'énergie tandis que pour les plus longs termes la puissance de signal devient dominante.

#### b. Efficacité énergétique cognitive radio

Une radio cognitive (CR) est une radio intelligente qui permet de sélectionner dynamiquement un canal de communication dans le spectre sans fil et peut adapter ses paramètres de transmission et de réception en conséquence.

#### c. Les antennes directionnelles

Permettre aux signaux d'être envoyés et reçus dans une direction à la fois, ce qui améliore la portée de transmission et le débit [37].

### 2.4.2.2 Techniques du Duty-cycling

Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau.

Comme les nœuds-capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling [32]. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle (i.e., ils dorment la plupart du temps).

#### a. Les protocoles Sleep/Wake up

Dans différents types d'applications de RCSFs, les nœuds perdent une partie de leurs énergies durant l'état "en écoute" en attendant la détection d'un événement.

Cette énergie est assez importante puisqu'elle est presque du même ordre que celle nécessaire à la réception. Les protocoles Sleep/Wake up servent à limiter au maximum l'état "en écoute" en entraînant les nœuds dans un état endormi périodique. Dans (Anastasi et al., 2009), les auteurs présentent trois types de réveil: les réveils périodiques, les réveils actifs (dus aux déclenchements/changements des paramètres de captage par l'atteinte d'un certain seuil) et les réveils organisés (des algorithmes qui synchronisent et organisent les capteurs à réveiller pour garantir une couverture minimale du réseau).

## **b. Les protocoles du niveau MAC**

Ce type de protocole concerne les nœuds sélectionnés pour rester actif afin d'assurer la connectivité du réseau. Cependant, ces nœuds peuvent passer en mode sommeil quand ils n'ont pas de message à envoyer ou recevoir. Nous pouvons distinguer trois classes de protocoles MAC: les protocoles MAC reposant sur TDMA, les protocoles à accès aléatoire [36].

### **2.4.2.3 Réduction de donnée**

Une autre catégorie de solutions visant à réduire la quantité de données qui sera livrée à la station de base. Deux méthodes peuvent être adoptées conjointement: la limitation des échantillons inutiles et la limitation des tâches de détection parce que les deux transmissions de données et d'acquisition sont coûteuses en termes d'énergie.

#### **a. Agrégation**

Les réseaux de capteurs étant assez denses en général, cela signifie que des nœuds assez proches en terme de distance (voisins) peuvent capter les mêmes données (température, pression, humidité équivalentes par exemple) et donc il apparaît nécessaire d'introduire le mécanisme d'agrégation de données afin d'éviter la duplication d'information au sein du réseau de capteurs et donc de préserver leur énergie et donc d'augmenter la durée de vie du réseau. L'agrégation de données dans les réseaux de capteurs consiste à remplacer les lectures individuelles de chaque capteur par une vue globale, collaborative sur une zone donnée (clustering)[38].

#### **b. échantillonnages adaptatifs**

La tâche de détection peuvent être consommatrice d'énergie peuvent générer des échantillons inutiles qui affectent les ressources de communication et les coûts de traitement. Les techniques d'échantillonnage adaptatif ajustent le taux d'échantillonnage à chaque capteur tout en s'assurant que les besoins d'application sont satisfaits en termes de couverture ou des informations de précision. Par exemple, dans une application de surveillance, des détecteurs sonores de faible puissance peuvent être utilisés pour détecter une intrusion.

#### 2.4.2.4 Contrôle de topologie

Lorsque les capteurs sont déployés de manière redondante afin d'assurer une bonne couverture de l'espace, il est possible de désactiver certains nœuds tout en maintenant les opérations de réseau et de connectivité. Les protocoles de contrôle de Topologie exploitent la redondance dynamique de la topologie du réseau en fonction des besoins de l'application, afin de minimiser le nombre de nœuds actifs.

Effectivement, les nœuds qui ne sont pas nécessaire pour assurer la connectivité ou la couverture peut être désactivée afin de prolonger la durée de vie du réseau.

#### 2.4.2.5 Routage efficace en énergie

Le routage est une charge supplémentaire qui peut sérieusement drainer les réserves d'énergie. En particulier dans les régimes multi-saut, les nœuds plus près de la station de base doivent conduire plus de paquets ce qui cause l'épuisement de leurs batteries, parmi les techniques de conservation d'énergie dans le routage dans les réseaux de capteurs sans fil:

##### a. Architecture basé cluster

Consiste à organiser le réseau en groupes, où chaque groupe est géré par un nœud sélectionné connu sous le nom de cluster head . Le cluster head est responsable de coordonner les activités des membres et communiquer avec d'autres clusters head ou la station de base. Cela permet d'économiser l'énergie car les transmissions vers le puits ne sont effectuées que par le chef de cluster plutôt que par tous les nœuds de capteurs.

##### b. L'énergie comme critère de selection pour le routage

Une autre solution pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs est de considérer l'énergie comme une métrique dans la phase de configuration du trajet. En faisant cela, les algorithmes de routage ne se concentrent pas uniquement sur les chemins les plus courts, mais peut sélectionner le prochain saut selon son énergie résiduelle.

##### c. Routage multi-chemins

Bien que les protocoles de routage à chemin unique sont généralement plus simples que les protocoles de routage multi-chemins, ils peuvent rapidement épuiser l'énergie des nœuds sur le chemin sélectionné. En revanche, le routage multi-chemins permet à l'énergie d'être équilibré toute en alternant les nœuds d'acheminement.

##### d. L'emploi de station de base mobile

Dans les architectures des RCSF qui utilisent une station de base statique, les capteurs situés à proximité de la station de base épuisent la batterie plus vite que les autres nœuds de capteurs, conduisant à une déconnexion prématurée du réseau.

Ceci est dû au fait que tout le trafic est transféré vers le récepteur qui augmente la charge de travail des nœuds plus près de l'évier [37].

La figure 2.9 représente les techniques de conservation de l'énergie:

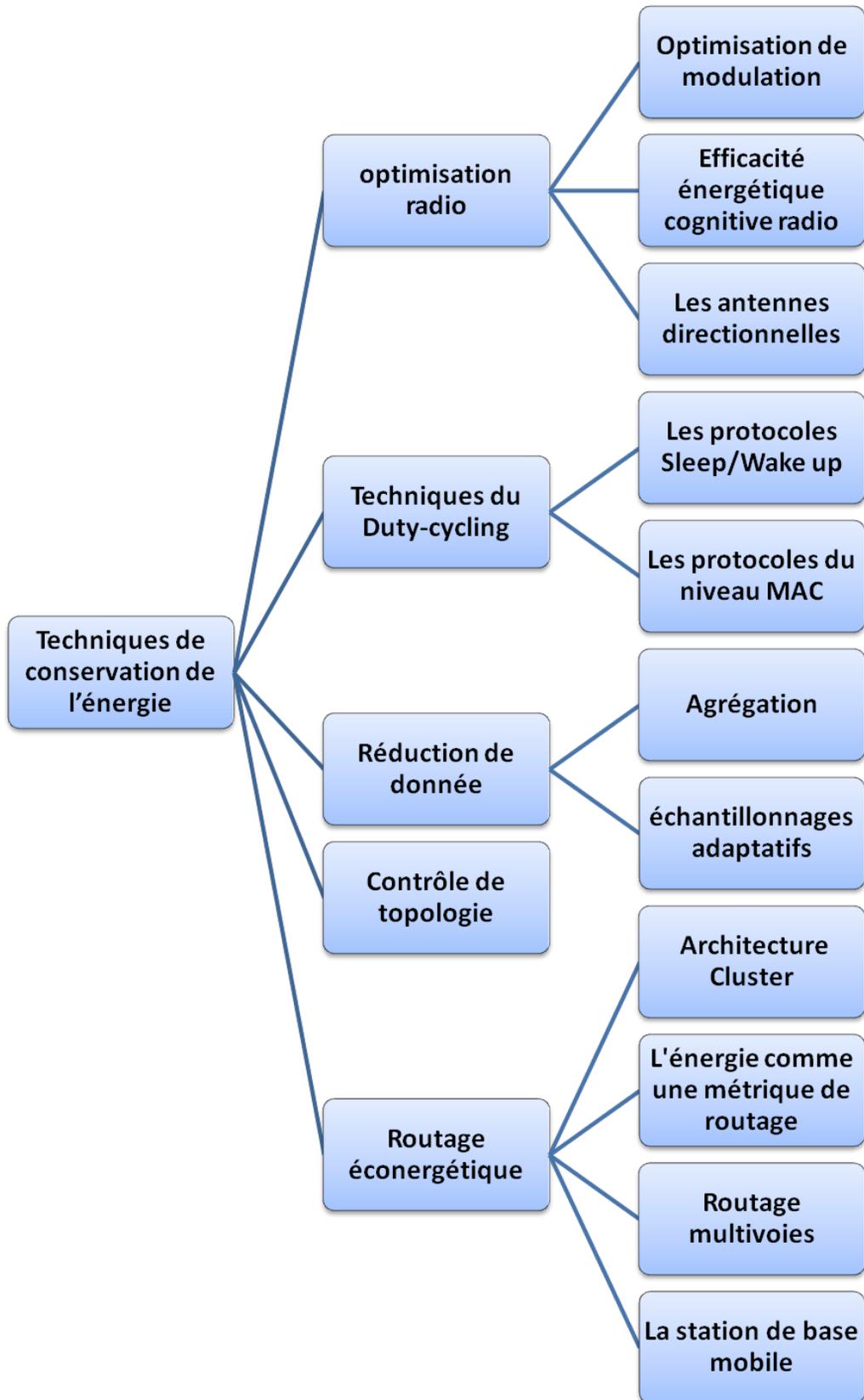


Figure 2.9: Les techniques de conservation de l'énergie.

## 2.5 L'équilibrage de charge

### 2.5.1 Le principe de l'équilibrage de charge

L'objectif de l'équilibrage de charge consiste à mettre à profit, de la meilleure façon, les possibilités d'utilisation des ressources. Il vise à garantir qu'une machine n'est pas surchargée et instaurer une charge uniforme sur toutes les machines. Par conséquent, l'équilibrage de charge est une technique de répartition égale de la charge qui signifie que la charge de travail est divisée en parts égales entre les différentes machines.

Les objectifs d'une politique d'équilibrage de charge sont:

- Atteindre un débit maximal.
- Réduire le temps de réponse.
- Avoir un réseau sans congestion.
- Utilisation optimale des ressources

### 2.5.2 Classification des stratégies d'équilibrage de charge

#### 2.5.2.1 L'équilibrage de charge local contre l'équilibrage de charge global

Dans la stratégie d'équilibrage de charge local, les stations sont divisées en différents groupes, chaque station utilise l'information locale d'autre station dans son petit voisinage pour décider un transfert de charge pour diminuer la communication vers la station distante. Pour accomplir une balance locale, une station communique avec son voisin le plus proche. Dans la stratégie d'équilibrage de charge globale les informations globales de toutes les stations sont traitées pour lancer l'équilibrage de la charge.

#### 2.5.2.2 L'équilibrage de charge centralisé et distribué

Dans l'équilibrage de charge centralisé, le nœud central est largement utilisé dans la répartition de charge à d'autres nœuds de capteurs, tandis que les autres nœuds sont moins utilisés. Le principal problème avec la stratégie centralisée est que si le nœud central échoue alors l'ensemble du réseau tombe en panne. Il y a seulement un nœud principal et toutes les décisions liés à l'équilibrage de charge sont exécutées pas ce dernier.

La figure 2.10 représente l'équilibrage de charge centralisée:

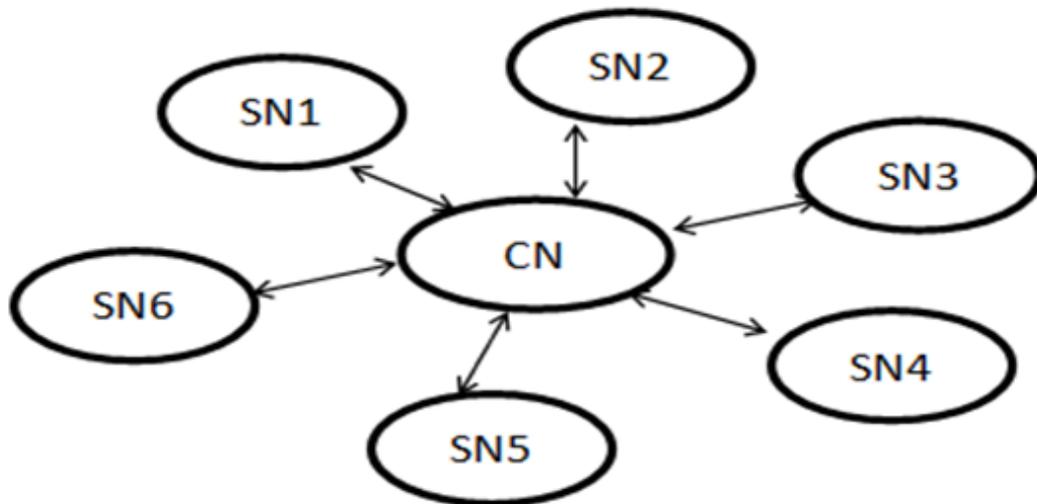


Figure 2.10: Équilibrage de charge centralisée [39].

La figure 2.10 montre l'équilibrage de charge centralisée dans laquelle CN représente le nœud central ou le nœud maître et SN représente les nœuds environnants ou nœuds esclaves. Dans le diagramme toutes les décisions d'équilibrage de charge sont effectuées par le nœud central.

Dans l'équilibrage de la charge répartie, les charges sont réparties également entre les nœuds de capteurs. Il n'y a pas de nœud maître ou nœud central, la décision d'équilibrage de la charge est prise par chaque nœud.

Dans l'équilibrage de charge distribuée la congestion dans l'ensemble du réseau diminue et sa durée de vie augmente. Le taux de perte de paquets est également réduit dans l'équilibrage de la charge répartie.

### 2.5.2.3 La stratégie d'équilibrage de charge Expéditeur-initié ou récepteur-initié

Dans les politiques de l'expéditeur à l'initiative, les nœuds congestionnés tentent de déplacer le travail vers des nœuds légèrement chargés. Tandis que, dans les politiques du récepteur à l'initiative, les nœuds légèrement chargés recherchent des nœuds fortement chargés à partir de laquelle le travail peut être reçu pour augmenter sa charge [39].

## 2.5.3 Equilibrage de charge dans les RCSFs

Le mode de communication basé sur le regroupement (clustering) est considéré comme le mode de communication le plus approprié pour les réseaux de capteurs

sans fil. Dans un grand réseau de capteurs, les nœuds de capteurs peuvent être regroupés en petites groupes (cluster). Chaque groupe a une tête (cluster-head) pour coordonner les nœuds du groupe qui sont regroupés autour d'elle.

Initialement, les nœuds de capteurs sont déployés au hasard. Ils sont de nature hétérogène avec les différents niveaux d'énergie. Les nœuds avec l'énergie supérieure se trouvant dans la région sont considérés comme le (cluster-head). Les clusters membres envoient les données au cluster-head qui renvoie à la station de base[40].

La figure 2.11 représente un exemple de structure de réseau en cluster:

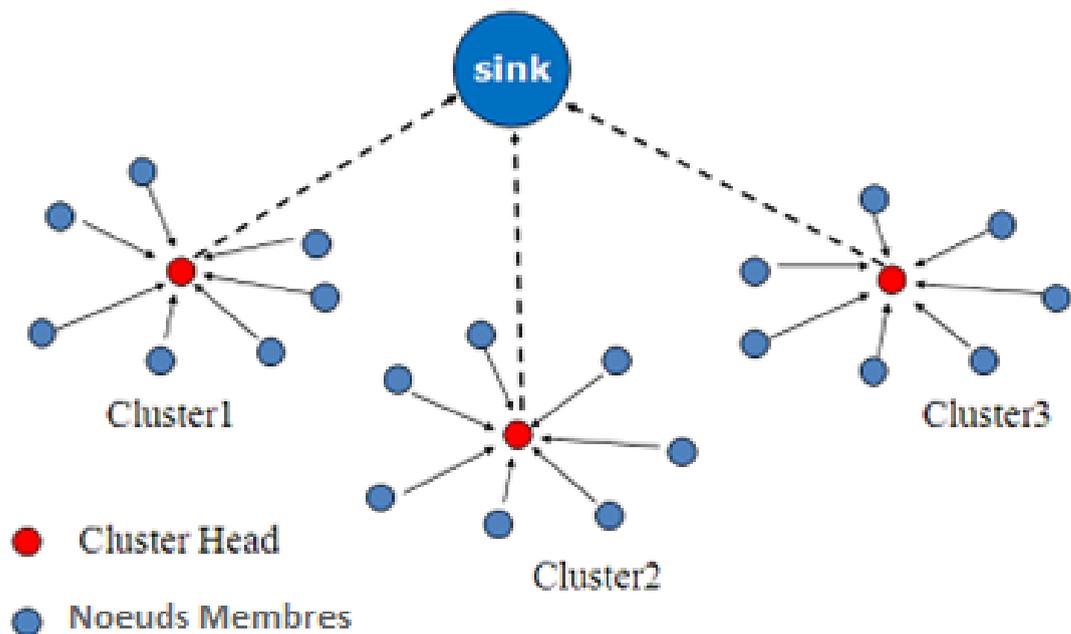


Figure 2.11: Exemple de structure de réseau en cluster [40].

Le Clustering présente de nombreux avantages, à savoir, économiser la bande passante de communication, prolonger la durée de vie du réseau, diminuer la redondance des paquets de données et réduire le taux de consommation d'énergie, etc. La plupart des protocoles basés sur les clusters utilisent une communication à un seul saut pour envoyer des données à partir des (cluster-head) à la station de base [40].

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes approches du routage qui peuvent être distinguées suivant la structure du réseau, le mode opératoire ainsi que la manière d'établissement de la route, comme nous avons cité quelques protocoles pour chaque approche. Nous avons ainsi parlé de la consommation d'énergie dans les RCSF et les problèmes liés à cette dernière.

Afin d'augmenter la durée de vie du réseau les capteurs doivent économiser au maximum leur énergie car la durée de vie d'un nœud dépend de la durée de vie

de leur batterie pour cela nous avons présenté les mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs. Parmi ces mécanismes la technique d'équilibrage de charge qui offre une répartition équitable ainsi une augmentation de la durée de vie du réseau. L'objectif du prochain chapitre est d'utiliser cette technique.

# 3

Proposition et simulation d'une solution  
de routage assurant l'équilibrage de charge  
dans les RCSF

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons notre proposition afin d'améliorer le protocole de routage AORP (an Adaptative Optimized energy efficient Routing Protocol for WSNs)[41], l'objectif principal de notre proposition est de diviser la charge de travail équitablement entre les nœuds les plus proches de la station de base dans le but de prolonger la durée de vie du réseau.

Dans un premier temps, nous présentons le protocole AORP et son fonctionnement, puis nous faisons une étude critique de ce protocole, en soulevant ses inconvénients. Ensuite nous présentons notre proposition qui a pour objectif d'améliorer ce protocole afin d'arriver à un protocole plus efficace.

## 3.2 Motivation

Le routage est l'une des problématique les plus fondamentales dans un RCSF en raison de contraintes matérielles telles que l'énergie, alors il faudra la minimisée pour maximiser la durée de vie du réseau.

Pour cela plusieurs algorithmes et protocoles de routage en été proposés afin de faire parvenir les données capturées à la station de base, en empruntant les chemins induisant des dépenses énergétiques minimales, et parmi ces protocoles nous trouvons le protocole AORP qui est un protocole récent et efficace en termes de consommation d'énergie, tel que chaque nœud calcule son coût minimal jusqu'à la station de base, l'idée clé de notre approche est d'équilibrer la charge de travail entre les nœuds les plus proches de la station de base.

## 3.3 AORP

### 3.3.1 l'idée de base

l'idée de base est que chaque nœud doit avoir une estimation de son coût minimal d'émission vers la station de base ainsi que les coûts minimaux de tous ses voisins. La fonction de coût est définie de telle sorte à:

- prendre en considération explicitement le niveau d'énergie restante au niveau des nœuds d'un chemin.
- et prendre en considération implicitement le nombre de sauts jusqu'à la station de base.

La fonction de coût est définit comme suit:

$$f(C) = a^{k-1} \frac{(1+b) \times E_{max}}{b \times (E_1 - e_{10}) + E_{max}} + a^{k-2} \frac{(1+b) \times E_{max}}{b \times (E_2 - e_{21}) + E_{max}} + \dots + a \frac{(1+b) \times E_{max}}{b \times (E_{k-1} - e_{k-1, k-2}) + E_{max}} + \frac{(1+b) \times E_{max}}{b \times (E_k - e_{k, k-1}) + E_{max}}$$

Ou:

- Le paramètre  $a$  : au niveau de la fonction de coût proposée, l'utilisation du paramètre  $a$  ( $>1$ ) permet de privilégier le niveau d'énergie restante des voisins les plus proches de la station de base lors du calcul de la fonction de coût. Ceci est intéressant car les nœuds proches de la station de base sont les premiers dont le niveau d'énergie s'épuise. Par conséquent, il est préférable de pondérer le niveau d'énergie restant des voisins directs de la station de base avec un coefficient élevé, les voisins du deuxième niveau avec un coefficient moins élevé ainsi de suite.
- Le paramètre  $b$ : le choix d'un paramètre  $b$  faible de telle sorte que les chemins avec moins de sauts vers la station de base aient un coût moindre, permet : d'une part l'optimisation de la consommation d'énergie consommée et d'une autre part l'optimisation des délais de transmission. En effet, les chemins ayant moins de sauts sont toujours privilégiés.
- Le facteur  $e_{ij}$  représente la quantité d'énergie requise pour transmettre sur le lien  $ij$ .
- le facteur  $E_i$  représente l'énergie restante au niveau du nœud  $j$ .
- $k$  est le nombre de sauts dans la topologie.

### 3.3.2 Les opérations du protocole

Dans ce protocole, chaque nœud dispose d'une table locale de voisinage (NT: Neighbors Table). Chaque entrée de cette table a la structure suivante:

<Id Neighbor>: l'identificateur du voisin;

<Cost>: le coût minimal vers la station de base du voisin;

<nb-lost-messages>: le nombre de messages perdus parmi les  $n$  derniers messages transmis.

De plus, chaque nœud garde localement une variable de coût 'Self Cost' contenant son propre coût minimal vers la station de base, qui est initialisée à l'infinie.

#### La phase d'initialisation:

Durant cette phase, des messages d'initialisation ayant la structure suivante sont diffusés dans le réseau.

Field	Size
Source Address	16
Destination Address	16
Cost	16
Total	48

Table 3.1: L'entête d'un message d'initialisation AORP.

A la réception d'un message de notification, un nœud intermédiaire ajoute le nœud émetteur à sa table de voisinage avec le coût associé. Si ce dernier figure déjà dans la table de voisinage, son coût est mis à jour. Ce message n'est rediffusé vers les voisins que s'il y a eu une amélioration au niveau du coût local (Self Cost).

**Initialization:**

SelfCost(Sink)  $\leftarrow$  0

For all other nodes: SelfCost(Node<sub>k</sub>)  $\leftarrow$  infinity

**Receive**  $\langle i, \text{Cost\_of\_node} \rangle$  **at Node**<sub>j</sub>

**if** (i = NT) **then**

Cost\_field\_of\_node<sub>i</sub>\_in\_NT<sub>j</sub>  $\leftarrow$  Cost

**else**

Add  $\langle i, \text{Cost} \rangle$  to NT<sub>j</sub> // add an entry corresponding to node<sub>i</sub> in NT<sub>j</sub>

**End if**

**if** ( $a \times \text{Cost} + \frac{(1+b) \times E_{max}}{b \times E_j + E_{max}} < \text{Self C}$ ) **then**

SelfCost  $\leftarrow a \times \text{Cost} + \frac{(1+b) \times E_{max}}{b \times E_j + E_{max}}$

Broadcast  $\langle j, \text{Broadcast, Self Cost} \rangle$

**End if**

A la fin de cette étape, chaque nœud dispose d'une table de voisinage contenant une entrée pour chaque voisin, avec son coût minimal vers la station de base, en plus du coût minimal du nœud lui même vers la station de base.

**Envoi de données et mise à jour des tables:**

Lorsqu'un nœud observe une nouvelle donnée, il la transmet vers le voisin direct ayant le coût minimal. L'entête de donnée a la forme:

Field	Size
Source Address	16
Destination Address	16
Creator address	16
Cost	16
Total	64

Table 3.2: L'entête d'un message de données AORP.

Tous les voisins directs du nœud émetteur écoutent les messages transmis. A la réception, chaque nœud met à jour l'entrée liée à l'émetteur au niveau de la table

de routage, même s'il n'est pas le destinataire. Si le nœud émetteur ne figure pas dans la table de voisinage, une entrée avec le coût associé est ajoutée. Le nœud destinataire relaie le message vers le voisin direct ayant le coût minimal. Les autres nœuds qui ne sont pas destinataires le suppriment.

```
Receive <i,d, Cost_of_nodei,Data> at Nodej  
if (i ==NT) then  
  Add <i, Cost> to NTj // add an entry corresponding to nodei in NTj  
Else  
  Cost_field_of_nodei_in_NTj ← Cost  
Endif  
  
If (d=j) then  
  If (selfCost > Cost_field_of_nodek_in_NTj) then  
    Send <j, k, Self Cost, Data>  
  Else  
    Delete (Mess)  
    Send an error message to Application Layer  
  End  
Else  
  // Implicit Acknowledge  
  Delete (Mess)  
Endif
```

### 3.4 Etude critique de AORP

Après avoir analysé le principe de déroulement du protocole AORP, nous constatons la liste des critiques suivantes:

- Comme nous avons mentionné précédemment que AORP se base sur une fonction du coût, qui est le coût du chemin, Il est possible que le voisin direct ait une quantité d'énergie restante importante alors que le coût de son chemin est plus élevé par rapport au coût du chemin d'un autre voisin.
- Malgré que le protocole AORP assure un routage. Cependant, il ne garantie pas un équilibre dans le transfert de flux entre les nœuds intermédiaires.

### 3.5 Description de notre Approche

Vu que les nœuds les plus proches de la station de base sont les plus sollicités par le routage, pour cela nous avons pensé à équilibrer la charge de travail entre ces nœuds, en améliorant le protocole AORP.

L'idée de notre amélioration consiste à vérifier à chaque fois si le parent du voisin du nœud émetteur est une station de base ou pas, si c'est le cas, on vérifie si ce nœud

à d'autres voisins dont leur parent est une station de base, si c'est le cas on choisit le voisin ayant l'énergie la plus élevée.

Comme nous avons mentionné précédemment que parmi les opérations du protocole AORP est que chaque nœud dispose d'une table de voisinage contenant une entrée pour chaque voisin, nous avons utilisé cette opération pour atteindre le parent du voisin du nœud qui veut transmettre la donnée à la station de base, pour cela nous avons procédé comme suit :

1. Récupérer la table de voisinage du nœud émetteur.
2. Pointer sur son premier voisin.
3. Récupérer la table de voisinage de ce nœud.
4. Pointer sur le champ parent et vérifier si c'est une station de base ou pas si c'est le cas le nœud émetteur va prendre ce voisin comme son parent.

Refaire les mêmes étapes précédentes avec tous les voisins du nœud émetteur, s'il existe un autre voisin dont son parent est une station de base on compare son énergie avec celle du parent du nœud émetteur, si l'énergie résiduelle de ce voisin est plus élevée que l'énergie résiduelle du parent, le nœud émetteur va changer son parent et il va prendre celui qui a l'énergie résiduelle plus élevée. Après avoir parcouru toute la table de voisinage de l'émetteur, ce dernier va envoyer la donnée vers le parent.

## 3.6 Environnement de travail

### 3.6.1 TinyOS

TinyOS est le système d'exploitation open source pour les réseaux de capteurs sans-fil conçu par l'université américaine de BERKELEY. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC(Network embedded system C), langage orienté composant qui se rapproche syntaxiquement du langage le plus connu: le C [30].

Le plus gros avantage de TinyOS est qu'il est basé sur un fonctionnement événementiel, c'est-à-dire qu'il ne devient actif qu'à l'apparition de certains événements. Le reste du temps, le capteur se trouve en état de veille afin de garantir une durée de vie maximale aux faibles ressources énergétiques du capteur.

### 3.6.2 Les outils de simulation TinyOs

TinyOs offre des outils de Simulation ( TinyViz/Tossim/PowerTossim)[43]:

**TOSSIM** est le simulateur de TinyOs. Il permet de simuler le comportement d'un capteur (envoi/réception de messages via les ondes radios, traitement de l'information ...) au sein d'un réseau de capteurs.

**PowerTossim** permet de faire des simulations de la même manière que TOSSIM sauf que celui-ci prend en considération la consommation d'énergie, ainsi le nœud qui ne possède plus d'énergie s'arrête de fonctionner, ce qui nous permet d'exécuter la simulation jusqu'à la mort du réseau.

**TinyViz** est une application graphique qui donne un aperçu de notre réseau de capteurs à tout instant, ainsi que des divers messages qu'ils émettent. Il permet de déterminer un délai entre chaque itération des capteurs afin de permettre une analyse pas à pas du bon déroulement des actions, il possède aussi des options afin de pouvoir simuler la consommation d'énergie.

### 3.6.3 NesC (Network embedded system C)

Le système d'exploitation TinyOS s'appuie sur le langage NesC [40]. Celui-ci est une extension du langage C orientée composant ; il supporte alors la syntaxe du langage C et il est compilé vers le langage C avant sa compilation en binaire [30]. NesC est orienté pour satisfaire les exigences des systèmes embarqués. De plus, il supporte un modèle de programmation qui agrège l'administration des communications, les concurrences provoquant les tâches et les événements ainsi que la capacité de réagir par rapport à ces événements. Il réalise aussi une optimisation dans la compilation du programme, en détectant les carrières possibles de données qui peuvent produire des modifications concurrentes au même état, à l'intérieur du processus d'exécution de l'application. Une carrière de données se produit quand plus d'un fils peuvent simultanément accéder à la même section de mémoire (concurrency d'accès mémoire entre threads), et quand au moins l'un des accès est un "write". Comme il simplifie aussi le développement d'applications et réduit la taille du code [33].

Grâce à NesC il est possible de créer une application par un assemblage de composant nécessaire à l'application. Chaque composant correspond à un élément matériel (LEDs, timer, ADC ...) et peut être réutilisé dans différentes applications. Un composant est constitué alors de trois parties essentielles [43]: interfaces, modules et configurations.

**Les interfaces** permettent de spécifier des fonctions: des commandes ou des événements. Ces fonctions sont alors implémentées par le fournisseur ou l'utilisateur de l'interface, afin de distinguer les fonctions concernant les commandes de ceux concernant les événements, les fonctions sont précédées de `command` ou `event`. Voici un exemple d'application [43]:

```
1 Timer.nc
2 interface Timer {
3   command result_t start(char type,
4     uint32_t interval);
5   command result_t stop();
6   event result_t fired();
7 }
```

**Les modules** cette partie du code est généralement plus étendue et c'est dans celle-ci que l'on programme réellement le comportement qu'on souhaite voir réalisé par l'application. Cette partie là est à son tour divisée en trois sous-sections[33]: Uses, Provides, Implementation.

- La première sous-section, (provides), indique au compilateur les interfaces que va fournir notre composant. Par exemple, si notre composant est une application, on doit fournir au moins l'interface StdControl. La sous-section (implementation), est celle qui contiendra toutes les méthodes nécessaires pour fournir le comportement souhaité à notre composant ou à notre application. Cette sous-section doit contenir au moins: - Les variables globales que vont utiliser notre application. - Les fonctions qu'elle doit mettre en œuvre pour les interfaces qui nous fournissons. - Les événements qu'elle doit mettre en œuvre venant des interfaces que nous utilisons.
- La sous-section (uses) informe le compilateur que nous allons faire usage d'une interface (on pourra donc effectuer des appels aux méthodes de cette interface). Pour faire cela, on a besoin de respecter quelques règles: si nous utilisons une interface, il nous faut avoir dans la section (implementation) un lien ("wiring") reliant cette interface avec un composant qui la fournit. Finalement, utiliser une interface oblige implicitement à gérer les événements pouvant se produire du fait d'avoir utilisé cette interface précise [33].
- les configurations permettent de décrire l'architecture. Une configuration est donc constituée de modules et/ou d'interfaces ainsi que de la description des liaisons entre ces composants [43].

## 3.7 Les étapes de notre Simulation et ses résultats

### 3.7.1 Modifications apportées à AORP

Nous avons commencé notre simulation par l'ajout de notre code source dans le code source du protocole AORP, exactement dans le fichier "RouterP" et plus précisément dans la procédure de mise à jour de la route, représentée ci-dessous.

#### Procédure de mise à jour de la route

```
task void updateRouteTask()
{ uint8_t i;
  routing_table_entry* entry, * best ;
  uint32_t minCost, currentCost,linkCost, pathCost;
  uint32_t a,b;
  if (isSink) return;
  best = NULL;
  minCost = MAX_UINT32_VALUE;
  for (i = 0; i < routingTableActive; i++)
  {entry = &routingTable[i];
  if (entry->info.congested) continue;
  a= MAX_ENERGY + MAX_ENERGY / 10;
  b= call Energy.getEnrgyLevel() / 10 + MAX_ENERGY;
  linkCost=(uint16_t)((a*1000)/b);
  pathCost = linkCost + ( TWOALPHA * entry->info.cost ) /2;
```

```
if (pathCost < minCost)
{ minCost = pathCost;
best = entry;
}
}
if (best != NULL)
{
if ((routeInfo.cost == MAX_UINT32_VALUE) || (routeInfo.congested && (min-
Cost < (routeInfo.cost + CONGEST_PARENT_SWITCH_THRESHOLD))) ||
(minCost + PARENT_SWITCH_THRESHOLD < routeInfo.cost) )

if (!justEvicted && routeInfo.cost == MAX_UINT32_VALUE )
{
signal Routing.routeFound();
parentChanges++;
dbg("TreeRouting","Changed parent. from %d to %d n", routeInfo.parent, best-
>neighbor);
atomic
{
routeInfo.parent = best->neighbor;
routeInfo.cost = minCost;
routeInfo.congested = best->info.congested;

}
}
else
routeInfo.cost = minCost;
}
```

La procédure mise à jour de la route après l'ajout de notre code source, représenté ci-dessous, le protocole qu'on a obtenu nous l'avons nommée AORP amélioré.

### **Procédure de Mise à jour de la route après l'ajout de notre code source**

```
task void updateRouteTask()
{
uint8_t i;
routing_table_entry* entry, * best ;
uint32_t minCost, currentCost,linkCost, pathCost;
uint32_t a,b;
if (isSink) return;
best = NULL;
minCost = MAX_UINT32_VALUE;
for (i = 0; i < routingTableActive; i++)
{
entry = &routingTable[i];
if (entry->info.congested) continue;
```

```
a= MAX_ENERGY + MAX_ENERGY / 10;
b= call Energy.getEnrgyLevel() / 10 + MAX_ENERGY;
linkCost=(uint16_t)((a*1000)/b);
pathCost = linkCost + ( TWOALPHA * entry->info.cost ) /2;
if (pathCost < minCost)
{
minCost = pathCost;
best = entry;
}
}
if (best != NULL)
{
if ((routeInfo.cost == MAX_UINT32_VALUE) || (routeInfo.congested && (minCost < (routeInfo.cost + CONGEST_PARENT_SWITCH_THRESHOLD))) || (minCost + PARENT_SWITCH_THRESHOLD < routeInfo.cost) )

if (!justEvicted && routeInfo.cost == MAX_UINT32_VALUE )
{
signal Routing.routeFound();
parentChanges++;
dbg("TreeRouting","Changed parent. from %d to %d n", routeInfo.parent, best->neighbor);
atomic
{
routeInfo.parent = best->neighbor;
routeInfo.cost = minCost;
routeInfo.congested = best->info.congested;

}
}
else
routeInfo.cost = minCost;
for (i = 0; i < routingTableActive; i++)
{
entry = &routingTable[i];
if (entry->info.congested) continue;
entry = &routeInfo.neighbor;
if (entry->info.parent==0)
{
c = call Energy.getEnrgyLevel() ;
if (c > maxenergie)
maxenergie = c;
best = entry;
parentChanges++;
dbg("TreeRouting","Changed parent. from %d to %d n", routeInfo.parent, best->neighbor);
```

```
atomic
{
routeInfo.parent = best->neighbor;
  } }
}
```

### 3.7.2 Déroulement de la simulation

Nous avons fait des simulations sur différentes topologies en augmentant le nombre de nœuds dans le réseau.

#### a. Topologie avec 10 nœuds

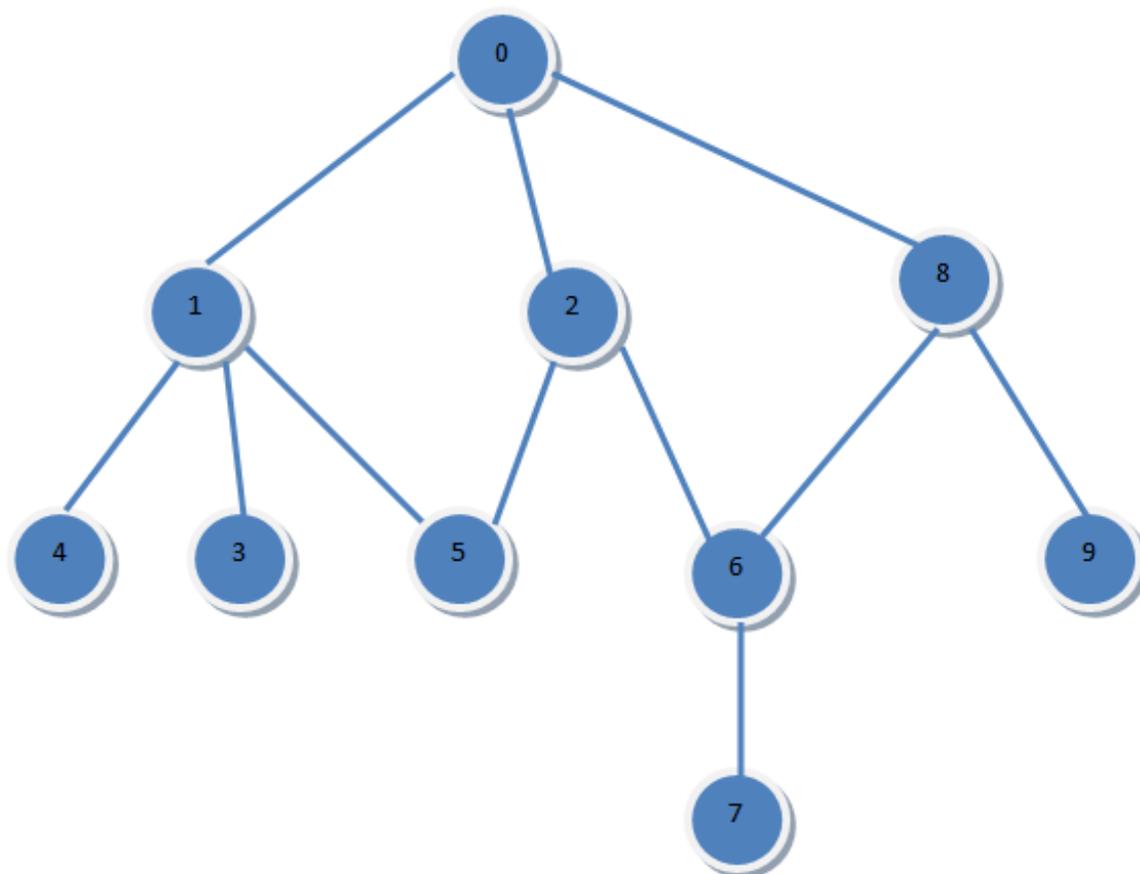


Figure 3.1: Topologie de 10 nœuds .

Cette topologie est composée de 10 nœuds. tel que le nœud 0 représente la station de base et les nœuds 1,2,8 ce sont ses voisins.

Nous avons testé le fonctionnement du protocole AORP sans aucun changement en utilisant cette topologie, puis nous avons testé le AORP amélioré. Les résultats de ce teste sont représenté dans le tableau 3.3

Protocole/Simulation	1	2	3	4
<b>AORP</b>	666957	612318,66	671240,66	666985,33
<b>AORP amélioré</b>	666956	667076,33	666796,33	666841,66

Protocole/Simulation	5	6
<b>AORP</b>	666911,33	666866,33
<b>AORP amélioré</b>	667005,33	667023,66

Table 3.3: La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites.

Après avoir interpréter ces résultats sous forme d'un graphe, nous avons obtenu la figure 3.2.

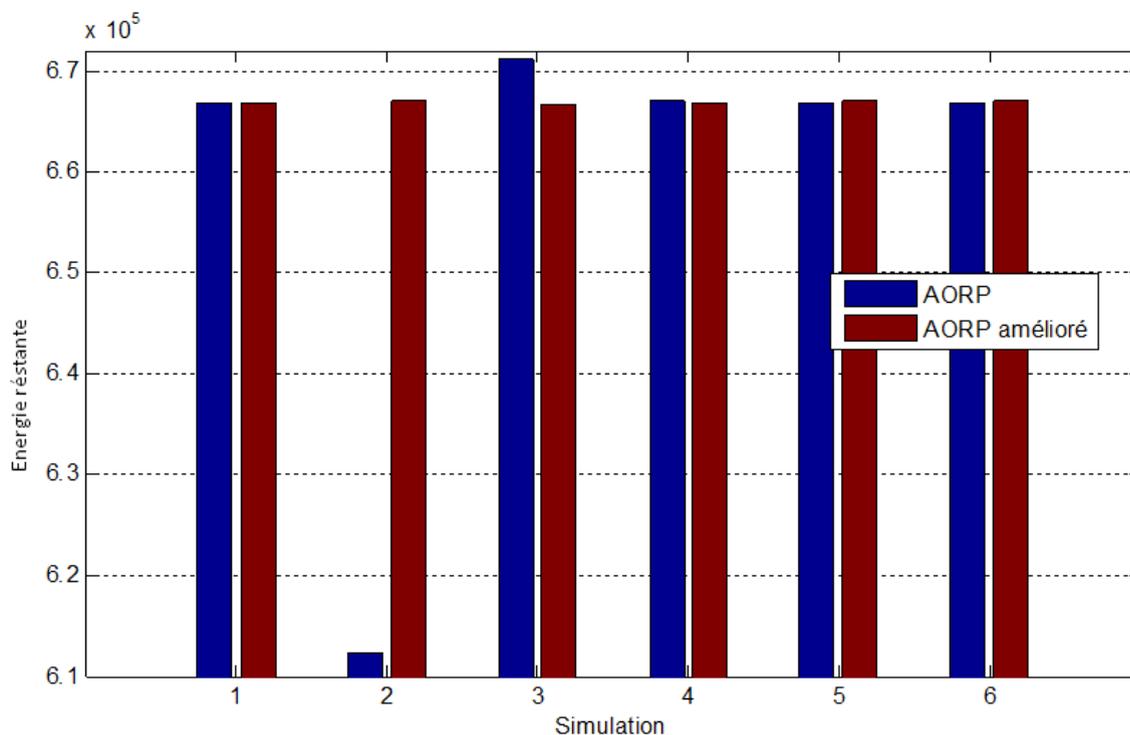


Figure 3.2: L'énergie moyenne restante.

### Analyse des résultats

Nous avons remarqué que l'énergie moyenne restante des nœuds en utilisant le protocole AORP dans la troisième simulation est plus importante par rapport à celle en utilisant le AORP amélioré, si on observe le tableau 3.4 on remarque que l'énergie restante du nœud 1 dans le AORP est plus importante par rapport à AORP amélioré, si on se réfère à la figure 3.1 on remarque que les nœuds 3 et 4 ont seulement le nœud 1 comme chemin, alors il se peut que ce sont ces nœuds qui ont capturer un événement ce qui a épuisé le nœuds 1.

Nœuds/Protocole	AORP	AORP amélioré
Nœud 1	651830	632353
Nœud 2	525280	531455
Nœud 8	836612	836581

Table 3.4: l'énergie restante des nœuds 1, 2, 8 à la 3 ème simulation dans les deux protocoles.

La figure 3.3 Et la figure 3.4 représentent le pourcentage de l'énergie consommée et l'énergie restante dans le AORP ainsi dans le AORP amélioré, pendant la première simulation.

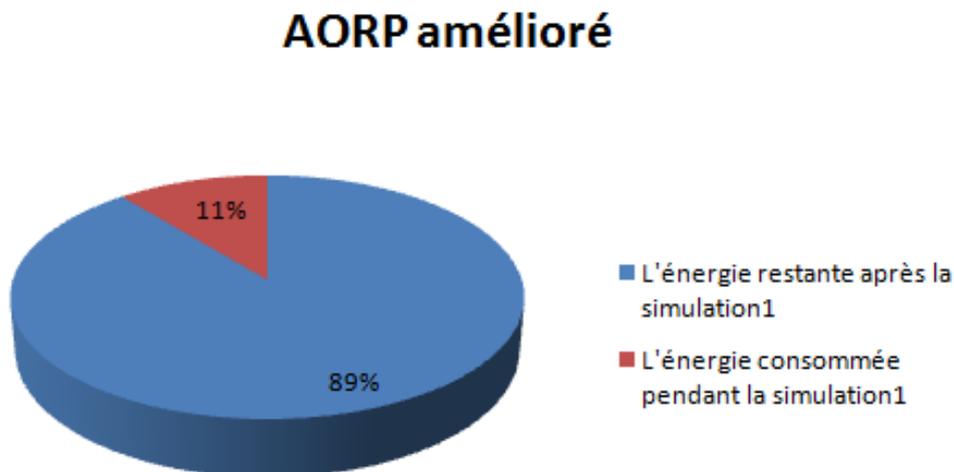


Figure 3.3: l'énergie consommée par AORP dans la simulation 1.

## AORP

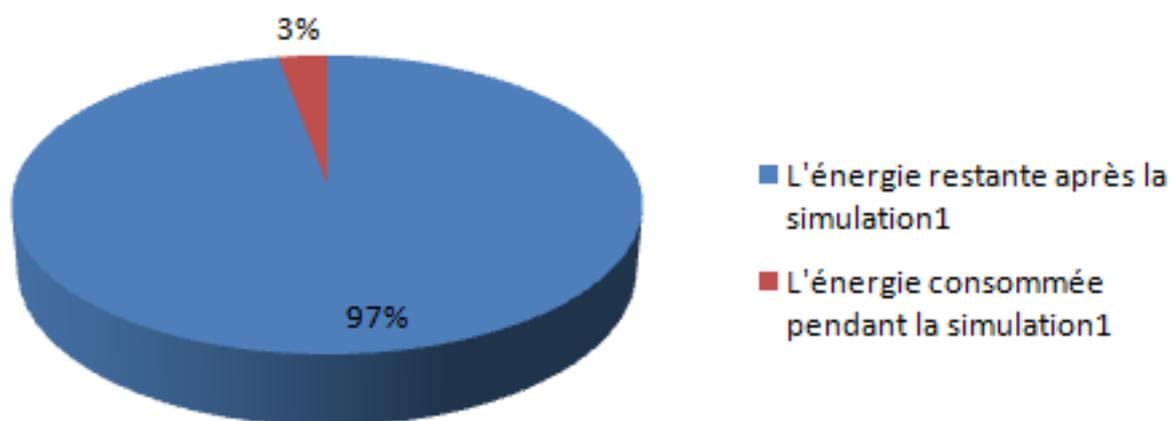


Figure 3.4: l'énergie consommée par AORP amélioré dans la simulation 1

On remarque que la quantité d'énergie consommée par les nœuds voisins de la station de base dans une topologie de 10 nœuds dans le AORP est plus importante que celle dans le AORP amélioré tel que dans le AORP un pourcentage de l'énergie consommée est de 11% alors que dans le protocole AORP amélioré est de 3%.

**b. Topologie avec 16 nœuds**

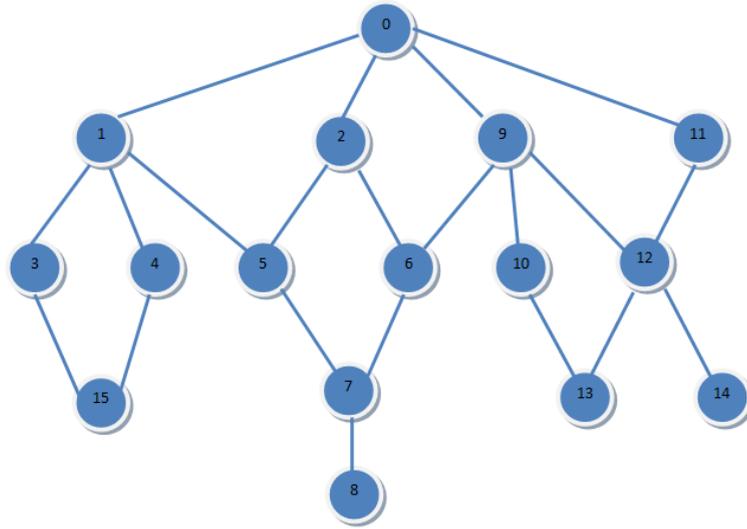


Figure 3.5: Topologie de 16 nœuds.

Cette topologie est composée de 16 nœuds. tel que le nœud 0 représente la station de base et les nœuds 1,2,9,11 ce sont ses voisins.

Nous avons fait un autre teste avec une topologie de 16 nœuds, représenté dans la figure 3.5

Protocole/Simulation	1	2	3	4
AORP	752228,5	752255	752339	752339
AORP amélioré	757074,25	752293,75	752449,25	753808,75

Protocole/Simulation	5	6
AORP	752239,25	752087
AORP amélioré	752323	753933,5

Table 3.5: La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites.

Après avoir interpréter ces résultats sous forme d'un graphe, nous avons obtenu la figure 3.6.

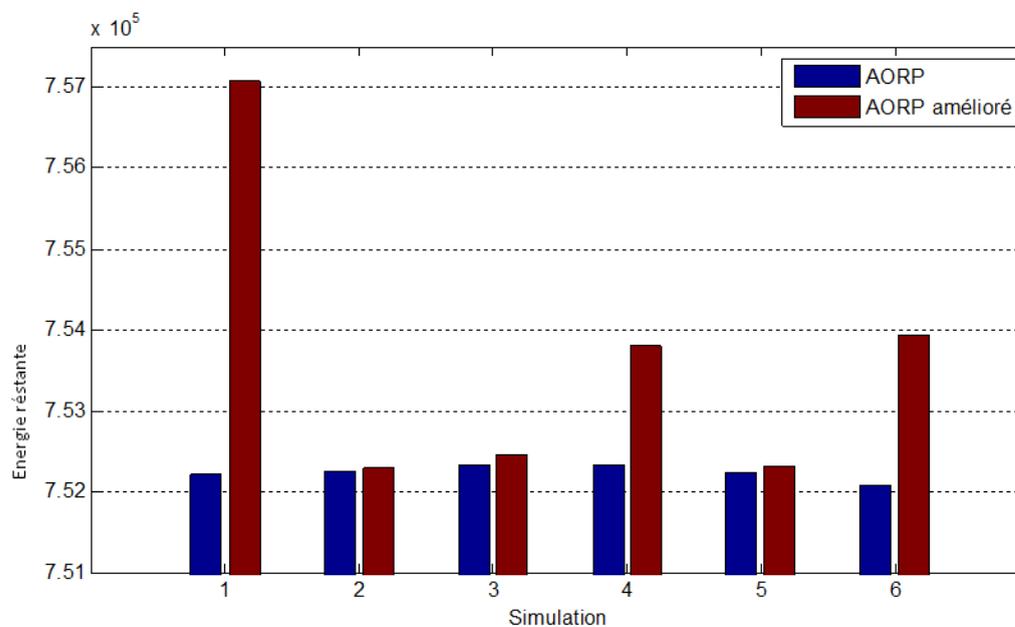


Figure 3.6: La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds proche de la station de base pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites.

### Analyse des résultats

Nous avons remarqué que l'énergie moyenne restante en utilisant le AORP amélioré est plus importante par rapport à celle en utilisant l'AORP.

La figure 3.7 représente le pourcentage d'énergie consommée ainsi que l'énergie résiduelle dans un RCSF en appliquant le protocole AORP.

## AORP

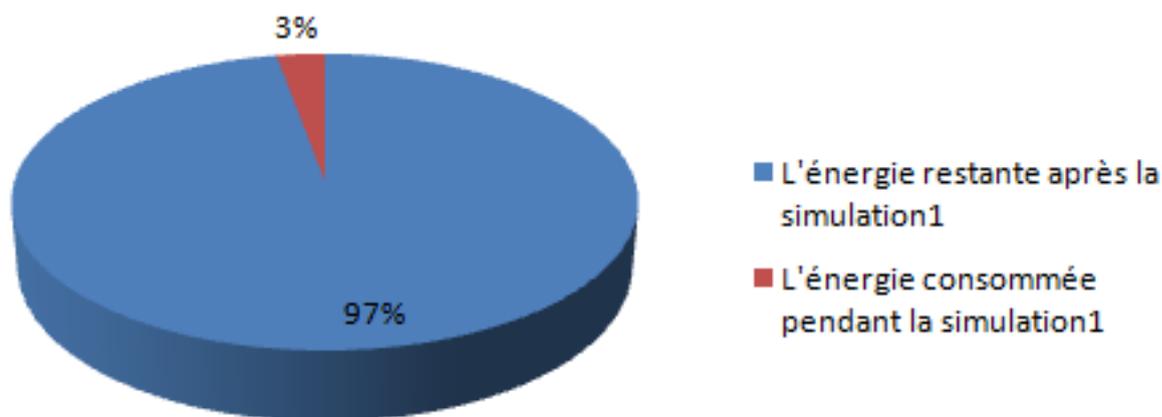


Figure 3.7: l'énergie consommée par AORP dans la simulation 1.

## AORP amélioré

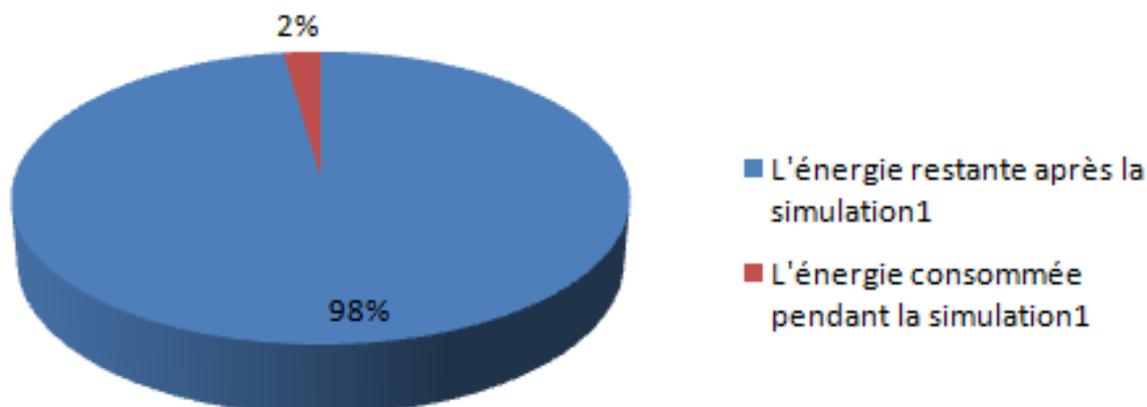


Figure 3.8: l'énergie consommée par AORP amélioré dans la simulation 1.

On remarque que la quantité d'énergie consommée par les nœuds voisins de la station de base dans une topologie de 16 nœuds dans le AORP est plus importante que celle dans le AORP amélioré tel que dans le AORP le pourcentage de l'énergie consommée est de 3% alors que dans le protocole AORP amélioré est de 2%.

c. Topologie avec 30 nœuds

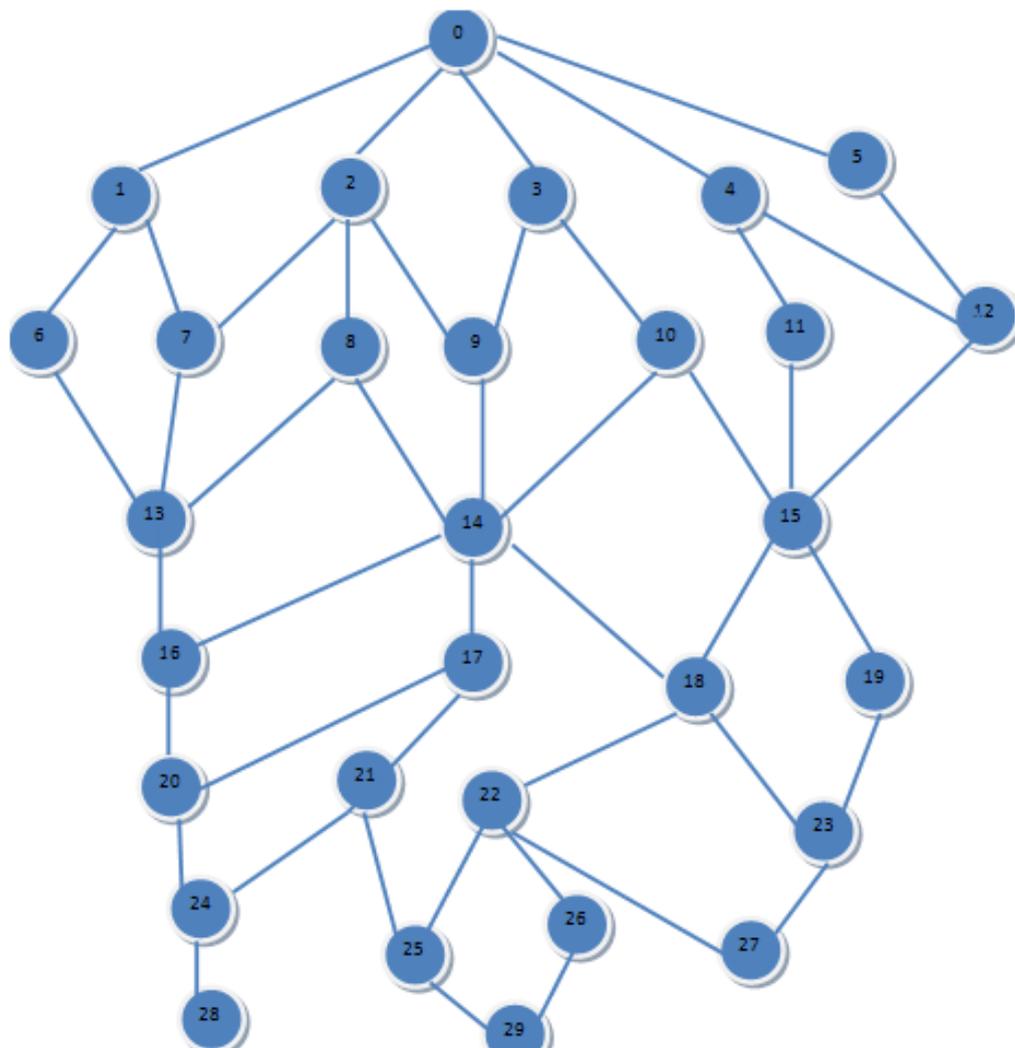


Figure 3.9: Topologie de 30 nœuds .

Cette topologie est composée de 30 nœuds. tel que le nœud 0 représente la station de base et les nœuds 1,2,3,4,5 ce sont ses voisins.

Nous avons fait d'autre testes avec la topologie ci-dessus et nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau 3.6.

Protocole/Simulation	1	2	3	4
AORP	546296	546149	546212	547229
AORP amélioré	546349	546284	546280	547477

Protocole/Simulation	5	6
AORP	546296	546317
AORP amélioré	548741	549959

Table 3.6: La quantité d'énergie moyenne restante des nœuds pour les deux protocoles en fonction du nombre de simulations faites.

Après avoir interpréter ces résultats sous forme d'un graphe, nous avons obtenu la figure 3.10.

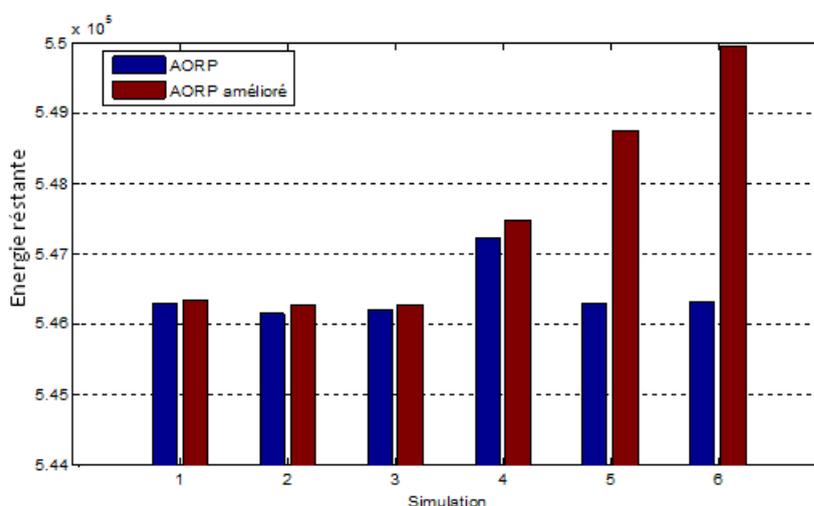


Figure 3.10: L'énergie moyenne restante.

### Analyse des résultats

Nous avons remarqué que l'énergie moyenne restante reste toujours élevé dans le AORP amélioré par rapport à AORP.

La figure 3.11 représente le pourcentage d'énergie consommée ainsi que l'énergie résiduelle dans un RCSF en appliquant le protocole AORP

## AORP

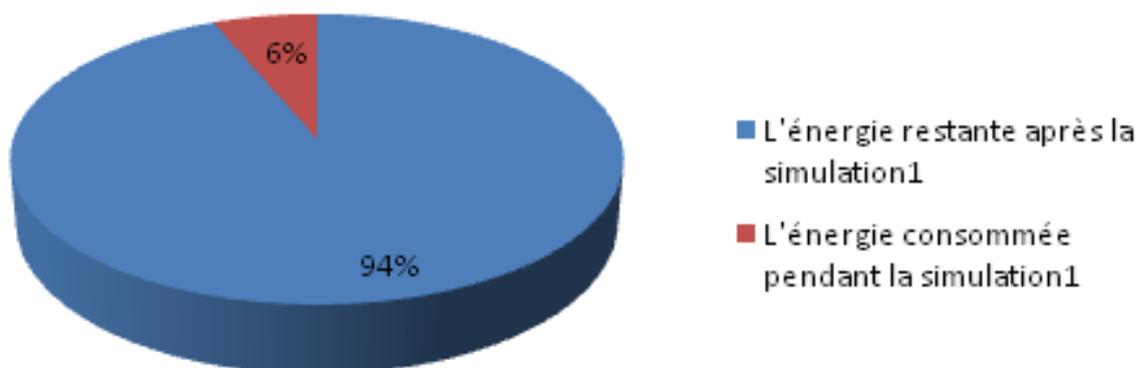


Figure 3.11: l'énergie consommée par AORP dans la simulation 1.

La figure 3.12 représente le pourcentage d'énergie consommée ainsi que l'énergie résiduelle dans un RCSF en appliquant le protocole AORP amélioré

## AORP amélioré

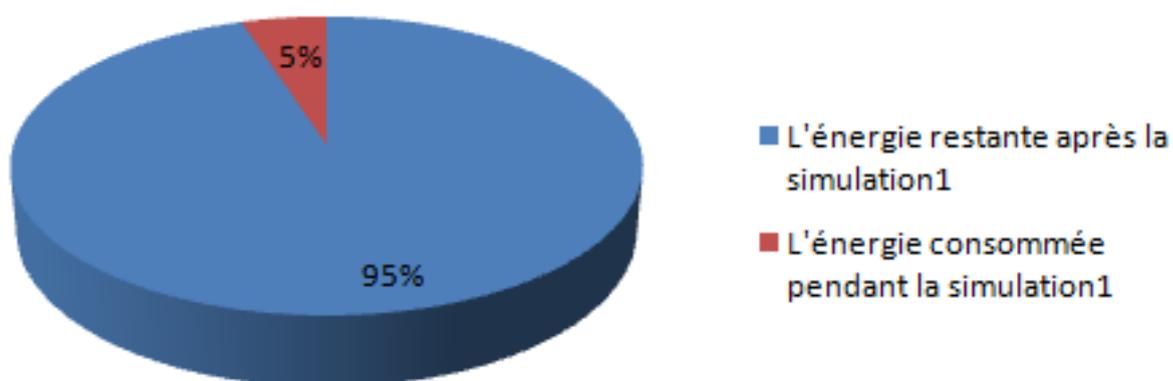


Figure 3.12: l'énergie consommée par AORP amélioré dans la simulation 1.

On remarque que la quantité d'énergie consommée par les nœuds voisins de la station de base dans une topologie de 30 nœuds dans le AORP est plus importante

que celle dans le AORP amélioré tel que dans le AORP le pourcentage de l'énergie consommée est de 6% alors que dans le protocole AORP amélioré est de 5%.

### **3.8 Conclusion**

Ce chapitre a porté sur une étude critique du protocole AORP, à partir de laquelle nous avons tiré des inconvénients. Pour palier à ces derniers, nous avons proposé une solution qui a pour objectif d'assurer l'équilibrage de charge dans un RCSF opérant avec AORP.

Puis nous avons décrit la solution proposée et donner les différentes étapes pour la simulée. Ensuite nous avons effectué plusieurs tests en commençant par simuler en premier lieu le protocole AORP puis nous l'avons simulé après l'avoir amélioré, et en dernier lieu nous avons fait une comparaison des résultats obtenus.

Les résultats de notre simulations montrent que l'équilibrage de charge entre les nœuds plus proches de la station de base améliore le protocole AORP en augmentant la durée de vie du capteur.

## **Conclusion & Perspectives**

Les réseaux de capteurs sont des types particuliers des réseaux de communication, ils ont été créés afin d'offrir des solutions pour la surveillance à distance et le traitement des données dans des environnements particuliers qui peuvent être inaccessibles ou hostiles. L'étude faite dans ce mémoire sur les réseaux de capteurs a montré que ces réseaux constituent un axe de recherche très fertile et peuvent être introduits dans plusieurs domaines. De plus, l'exploitation de ces capteurs, vu leurs caractéristiques et les ressources limitées dont ils disposent, doit être faite d'une manière rationnelle. En effet, il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine, en particulier la limitation de ressources énergétiques de ces capteurs. C'est pourquoi, il est nécessaire de concevoir des protocoles de routage efficaces dotés d'un mécanisme qui prend en considération la quantité d'énergie résiduelle des capteurs et du réseau déployé en général.

L'état de l'art donné dans ce mémoire sur les protocoles de routage et d'équilibrage de charge, nous a permis de comprendre leur fonctionnement, c'est-à-dire, comment l'information est acheminée de d'un nœud du réseau vers la station de base tout en trouvant un compromis entre la consommation d'énergie et le chemin le plus court. Parmi les protocoles les plus aboutis prenant en compte la technique d'équilibrage de charge, nous trouvons AORP. Dans ce travail, nous avons étudié le fonctionnement du protocole AORP et proposé une solution permettant de réduire la consommation de l'énergie des nœuds voisins de la station de base, qui sont réputés pour être gourmands en énergie puisqu'ils sont sollicités plus que les autres nœuds lors du routage de l'information. Nous avons ensuite simulé et comparé les résultats obtenus, ces derniers montrent que notre proposition améliore le protocole AORP en augmentant la durée de vie du réseau.

### **Perspectives**

Comme nous l'avons mentionné dans les résultats de simulations, dans notre approche nous avons amélioré l'efficacité énergétique du RCSF, et cela par l'introduction de la technique d'équilibrage de charge. Cependant, dans notre solution, nous nous sommes focalisés sur les nœuds qui sont voisins directs de la station de base. Par conséquent, comme perspective nous envisageons de généraliser cette technique sur tous les nœuds composant le chemin de routage d'un nœud particulier vers la station de base.

# Bibliography

- [1] M. GERMAIN. " Introduction aux réseaux." Forum ATENA 2012, p3.
- [2] F. LEMAINQUE." Tout sur les Réseaux sans fil." DUNOD, 2009, p5.
- [3] L. BAKLI et N. TAZERART. " Etude et amélioration d'un protocole de routage efficace en énergie dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Informatique, Université A /MIRA de Béjaïa, 2011.
- [4] Y. ACHOUR et L. AZIB. " Le routage sous contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Master en informatique, Université A /MIRA de béjaïa, 2012.
- [5] M. SAYAD. "Energy Efficient Protocol (EEP): un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil." Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Informatique, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique (ENSI), Oued-Smar, Alger 2009.
- [6] A. MOHAMMED, S. MERZOUG and A. BOUKERRAM. "Cluster-based Communication Protocol for Load-Balancing in Wireless Sensor Networks" International Journal of Advanced Computer Science And Applications (IJACSA), Vol.3, No. 6, 2011.
- [7] G. PUJOLLE "Les réseaux Editions 2005", éditions Eyrolles, 2005.
- [8] S. ATHMANI. "Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil." Mémoire de Magistère en Informatique, Université Hadj Lakhder Batna, 15/07/2010.
- [9] Y. YOUNES . "Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs." Mémoire de Magister en Informatique, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2012.
- [10] A. MAKHOUL. " Réseaux de capteurs: localisation, couverture et fusion de données." Thèse Doctorat en Informatique, Université de Franche-Comté, Vendredi 14 novembre 2008.
- [11] N. KAUR, Revue sur "Load Balancing in Wireless Sensor Network." International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Volume 3, Issue 5, May 2013.

- [12] M. LEHSAINI "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs: application à la domotique." Thèse de Doctorat Spécialité Informatique, Université A.B Tlemcen et Université de Franche-Comté, 2009.
- [13] H. KARL, A. Willig "Protocols and architectures for wireless sensor networks", John Wiley, 2005.
- [14] D/E. BOUBICHE. "protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Magister en Informatique, Université El'Hadj Lakhdar-Batna, 2007-2008.
- [15] M. RAMDANI. "Problèmes de sécurité dans les réseaux de capteurs avec prise en charge de l'énergie." Mémoire de Magister en Informatique, Université SAAD DAHLAB DE BLIDA, Novembre 2013.
- [16] L. KHELLADI et N. BADACHE. " Les réseaux de capteurs: état de l'art." Rapport de recherche, Université USTHB, Alger, Février 2004.
- [17] J.N Al-KARAKI et A.E KAMAL. "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey." IEEE Wireless Communication, Vol.11, No.6, December 2004.
- [18] D. AYANE et M. ZADDI. " Conservation d'énergie avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs." Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Informatique, Université A /MIRA de Béjaïa, 2007-2008.
- [19] L. SAMPER. "Modélisations et Analyses de Réseaux de Capteurs." Thèse doctorat en informatique. Laboratoire VERIMAG dans le cadre de l'école doctorale " Mathématiques , Sciences et Technologies de l'Information, Informatique ", le 7 avril 2008.
- [20] A. BENYAGOUB et M. CHARIF. "Sécurisation du protocole de routage hiérarchique LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen, 19 Septembre 2013.
- [21] A. BOUDJAADAR. "Plateforme basée agents Pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Magister en Informatique, Université 20 Aout 55 de Skikda, 2009/2010.
- [22] B. SAHRAOUI. "Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Master en Informatique, Université Abou Baker Belkaid- Tlemcen, 2013.
- [23] K. BEYDOUN. "Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs." Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Franche-Comte, 16 décembre 2009.
- [24] S. CHETTIBI. "Protocole de routage avec prise en compte de la consommation d'énergie pour les réseaux mobiles ad-hoc". Mémoire de Magister en Informatique, Université Mentouri Constantine, 2008.

- [25] F. JADD. "CSR: une extension hiérarchique adaptative du protocole de routage ad hoc DSR." Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Informatique et Télécommunications de Toulouse, 2006.
- [26] K. OUDIDI . "Routage et Qualité de Service dans les réseaux sans fil spontanés." Thèse de Doctorat en Information Multimédia et Mobile. L'École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes, Université Mohammed V - Souissi, 2009-2010
- [27] S. MOAD. " La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil." Etude bibliographique Master en Informatique IFSIC-Rennes 1, 2007/2008.
- [28] N. KHOULALENE; "Regroupement avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Magister en Informatique, Université A /MIRA de Béjaïa, 2009.
- [29] M. HADJILA . "Protocole de routage économes en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. " Thèse de Doctorat en Génie Electrique et Electronique, Université de Tlemecen, 2014.
- [30] L. DAUMAS, O.Uberti. "Implémentation d'un protocole de routage dans un réseau de capteurs sans-fils." Rapport de Recherche en Informatique, Université d'Avignon, 15 juin 2008.
- [31] V. RAGHUNATHAN, C. SCHURGERS, " energy-aware wireless microsensor networks ", mars 2002.
- [32] R. KACIMI. "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil." Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 28 Septembre 2009.
- [33] H. ALATRISTA, S. ALIAGA, K. AIGOUAICH, J. MATHIEU "Implémentation de protocole sur une plateforme de réseaux de capteurs sans-fils." Rapport de Recherche, Université de Montpellier II, 25 avril 2008.
- [34] N. KOUADRIA. "Codage et compression d'images pour des réseaux de capteurs sans fil." Thèse de Doctorat en Electronique, Université Badji Mokhetar Annaba, 2013/2014.
- [35] C. ARAAR. "Compression d'images dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire de Magister en Informatique, Université Badji Mokhetar Annaba, 2015.
- [36] L. MAKKAOUI "Compression d'images dans les réseaux de capteurs sans fil." thèse de doctorat en Traitement du Signal et Génie Informatique, Université de Lorraine, le 26 Novembre 2012
- [37] A. BOUABDALLAH, Y. CHALLAL "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey." Journal Computer Networks, Université de Technologie de Compiègne, Heudiasyc, UMR CNRS 7253, 60205 Compiègne, France, 5 April 2014

- 
- [38] A. AGUILAR, M. BARROUX , A. GONZALEZ Y. XUE , Rapport "Agrégation de données dans les réseaux de capteurs." .Rapport de Recherche, Université de Technologie Compiègne, automne 2010.
- [39] N. KAUR Review on Load Balancing in Wireless Sensor Network, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Department of Computer Science and Applications Kurukshetra University, Kurukshetra, Haryana, India, Volume 3, Issue 5, May 2013.
- [40] D. WAJGI , D. NILESHSINGH, V. THAKUR "Load balancing based approach to improve lifetime of wireless sensor network." International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN), Department of Computer Science and Engineering, Shri. Ramdeobaba College of Engineering and Management, Nagpur, India, Vol. 4, No. 4, August 2012
- [41] W. BECHKIT. "Un nouveau protocole de routage avec conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil." Mémoire d'Ingénieur d'État en Informatique, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique (E.S.I),2011.
- [42] E. DAMOU. "Simulation d'un réseau de capteurs avec TinyOS." Tuteur: Laurent MOUNIER, Centre Equation 2 avenue de Vignate,38610 Gières-France.
- [43] K. MEDJHOUM."Les Système embarqué TinyOS." Rapport de recherche en Informatique, Université de Brest, 2005.

## Résumé

Les réseaux de capteurs présentent une thématique de recherche innovante. Grâce à leurs avantages intéressants, ils sont présents dans divers domaines. Par ailleurs, ils sont composés de nombreux petits dispositifs nommés nœuds capteurs dispersés sur une zone précise pour collecter des informations.

L'alimentation énergétique des capteurs est assurée par les batteries, qui sont une réserve limitée et épuisable, au fil de temps cela présente une contrainte critique dans les réseaux de capteurs. La deuxième contrainte est environnementale : les capteurs sont parfois déployés aléatoirement et dans des environnements hostiles, de sorte qu'il est difficile de changer ou de recharger leurs batteries. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, parce qu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et du réseau entier. Plusieurs techniques ont été proposées afin de minimiser la consommation d'énergie.

Dans ce mémoire nous sommes intéressés à la technique d'équilibrage de charge pour améliorer le protocole de routage AORP en divisant la charge de travail équitablement entre les nœuds les plus proches de la station de base, dans le but d'étendre la durée de vie des capteurs et celle du réseau.

**Mots clés :** *Réseaux de capteurs sans fil, Protocoles de routage, Conservation d'énergie, Durée de vie, équilibrage de charge, Protocole AORP.*

## Abstract

Sensor networks have are an innovative research subject. Thanks to their attractive benefits, they are present in various fields. Moreover, they are composed of many small devices called nodes sensors scattered on a specific area to collect information. The energy supply of sensors is provided by the batteries, which are limited and exhaustible reserves along the time, which presents a critical constraint in sensor networks. The second constraint is environmental: the sensors are deployed randomly and sometimes in hostile environments, so it is difficult to change or recharge their batteries. Therefore, energy is the most precious resource in a sensor network, because it directly affects the life of the sensors and the entire network. Several techniques have been proposed to minimize power consumption. In this paper we are interested in load balancing technology to improve AORP routing protocol by dividing the workload evenly among the nodes that are closest to the base station in order to extend the lifetime of the sensors and that of the network.

**Keywords:** *Wireless Sensor Networks, Routing Protocols, energy conservation, Lifetime, load balancing, AORP protocol.*