

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA de Béjaïa  
Faculté des sciences exactes  
Département D'Informatique

## Master en Informatique

Option : Réseaux et Système Distribués

Thème

---

# Routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

---

*Devant le jury :*

PRÉSIDENT

*M<sup>r</sup> SEMCHEDINE Fouzi*

PROMOTEUR :

*M<sup>r</sup> MIR Foudil*

EXAMINATEURS :

*M<sup>lle</sup> KHOULALENE Nadjat*

*M<sup>r</sup> KHANOUCHE M<sup>ed</sup> Essaid*

*Présenté par :*

*YAHIAOUI Nadira*

*TAFUKT Meryem*

2011-2012



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

*N*ous tenons tout d'abord à remercier *M<sup>r</sup>* MIR Foudil pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer. Ses conseils précieux ont permis une bonne orientation dans la réalisation de ce modeste travail.

*N*os remerciements vont également au président *M<sup>r</sup>* SEMCHEDINE Fouzi et aux membres de jury *M<sup>elle</sup>* KHOLALENE Nadjjet et *M<sup>r</sup>* KHANOUCHE *M<sup>ed</sup>* Essaid d'avoir accepté de juger notre travail et consacré leurs temps à la lecture et à la correction de ce mémoire.

*N*os remerciements s'adressent aux enseignants et aux personnels administratifs du département Informatique .

*N*ous tenons à remercier vivement toutes celles ou ceux qui nous ont accompagné tout au long de ce parcours, pour les conseils avisés qu'ils nous ont dispensés, à la sollicitude dont ils ont fait preuve à notre égard, et les documents et outils mis gracieusement à notre disposition.

*N*os remerciements les plus vifs vont tout particulièrement à nos parents.

*E*nfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire (Samir, Nadir, Siham et Souhila ).



Tout d'abord je remercie Dieu Le Tout Miséricordieux,  
Ton amour Ta miséricorde et Tes grâces à mon endroit m'ont fortifiée dans  
La persévérance et l'ardeur au travail.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents et mes beaux parents et à toute ma famille  
A mon cher et patient mari et mon amour de fille Yousra.  
A mes frères et sœurs, mon beau frère et mes belles sœur.  
A mes amis et tous ceux qui m'ont aidé.  
A ma binôme Tafoukt Meryem et sa famille.

***Yahiaoui Nadira***

***Je dédie ce modeste travail :***

*Aux deux êtres les plus chers et précieux de ma vie pour leur amour, leur soutien et leur patience à vous papa et maman.*

***A mes adorables frères Lamine, Mehdi et Atheman .***

***A mes sœurs Tania, Nina et Rima qui sont mes modèles .***

***A mon adorable niece Eden et son papa Nabil.***

***A Grand mère .***

***A la mémoire de khali Cherif.***

***A ma binôme et amie Yahiaoui Nadira et sa famille.***

***A tous mes ami(e)s dont la liste est longue***

***Tafoukt Meryem***

# Table des matières

<b>Table des Matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des Figures</b>	<b>i</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités et notions de base sur les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Les réseaux sans fil . . . . .	3
1.3 Les réseaux Ad-hoc . . . . .	4
1.3.1 Définition . . . . .	4
1.3.2 Caractéristiques des réseaux ad hoc . . . . .	5
1.4 Les réseaux de capteurs . . . . .	5
1.4.1 Définition d'un capteur . . . . .	5
1.4.2 Architecture d'un nœud capteur . . . . .	5
1.4.3 Définition d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	7
1.4.4 Architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	7
1.4.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	8
1.4.6 Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	9
1.4.7 Facteurs et contraintes de conception d'un réseau de capteurs sans fil	12
1.4.8 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	14
1.5 Conclusion . . . . .	18

<b>2</b>	<b>Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Défis du routage dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	19
2.2.1	Déploiement des capteurs . . . . .	19
2.2.2	Modèle de livraison de données . . . . .	20
2.2.3	Hétérogénéité Nœuds/liens . . . . .	20
2.2.4	Qualité de service . . . . .	21
2.2.5	Agrégation des données . . . . .	21
2.2.6	Dynamicité du réseau et mobilité . . . . .	22
2.3	Approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	22
2.3.1	Classification selon la structure du réseau . . . . .	24
2.3.2	Classification selon les fonctions des protocoles . . . . .	34
2.3.3	Classification selon l'établissement de la route . . . . .	38
2.3.4	Classification selon l'initiateur des communications . . . . .	42
2.4	Mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	43
2.4.1	Energie de capture . . . . .	44
2.4.2	Energie de traitement . . . . .	44
2.4.3	Energie de communication . . . . .	44
2.5	Conclusion . . . . .	49
<b>3</b>	<b>N2E-WSNs : New Energy-Efficient routing protocol for Wireless Sensor Networks</b>	<b>50</b>
3.1	Introduction . . . . .	50
3.2	Motivation . . . . .	51
3.3	Etude critique du protocole SGDF . . . . .	51
3.3.1	Fonctionnement du protocole SGDF . . . . .	51
3.3.2	Critiques . . . . .	54
3.4	Une nouvelle approche de routage . . . . .	54

3.5	Hypothèses et principe de fonctionnement . . . . .	54
3.5.1	Hypothèses . . . . .	54
3.5.2	Description du protocole N2E-WSNs . . . . .	55
3.5.3	Exemple appliqué au protocole N2E-WSNs . . . . .	58
3.6	Conclusion . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Simulation et Analyse de performances</b>	<b>61</b>
4.1	Introduction . . . . .	61
4.2	Modèle de simulation . . . . .	61
4.2.1	Description du système . . . . .	62
4.2.2	Modèle d'énergie . . . . .	62
4.2.3	Métriques de performances . . . . .	63
4.2.4	Variables descriptives du système . . . . .	64
4.2.5	Evènements discrets du système . . . . .	66
4.2.6	Choix du langage de programmation . . . . .	66
4.2.7	Etapas de réalisation du programme de simulation . . . . .	67
4.3	Les résultats de simulation . . . . .	69
4.3.1	L'énergie restante moyenne . . . . .	69
4.4	Conclusion . . . . .	71
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>72</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>74</b>

# Table des figures

1.1	Les composants d'un nœud de capteur. . . . .	6
1.2	Architecture d'un RCSF . . . . .	8
1.3	Les RCSFs dans le domaine militaire. . . . .	10
1.4	Les RCSFs pour la surveillance des lieux hostiles. . . . .	10
1.5	Les RCSFs dans le domaine de sécurité. . . . .	11
1.6	Les RCSFs dans le domaine médicale . . . . .	11
1.7	Les RCSFs dans le domaine commerciale . . . . .	12
1.8	La pile protocolaire d'un réseau de capteurs. . . . .	14
1.9	Types de communication dans les réseaux de capteurs sans fil. . . . .	17
2.1	Classification des approches de routage dans les RCSFs. . . . .	23
2.2	Le protocole diffusion dirigée. . . . .	26
2.3	Topologie hiérarchique. . . . .	29
2.4	Fonctionnement de MFR. . . . .	33
2.5	Diagramme d'état des nœuds. . . . .	40
2.6	La surécoute dans une transmission. . . . .	46
3.1	Initialisation du réseau. . . . .	52
3.2	Exemple du fonctionnement du protocole SGDF. . . . .	53
3.3	Organigramme de la première étape de notre approche. . . . .	56
3.4	L'organigramme de la deuxième étape de notre approche. . . . .	57
3.5	Exemple d'application du protocole N2E-WSNs. . . . .	58

4.1	Modèle d'énergie . . . . .	63
4.2	Fonctionnement du programme de simulation. . . . .	67
4.3	Déploiement des capteurs. . . . .	68
4.4	Energie moyenne restante. . . . .	70

# Liste des tableaux

# Introduction Générale

Le besoin primordial d'utiliser des infrastructures sans fil afin de contrôler, de surveiller et de mesurer les différents phénomènes physiques (la température, l'humidité, la pression, les vibrations, etc.), où l'installation d'infrastructure filaire n'est pas possible, émergent dans plusieurs secteurs : la santé, militaire, l'agriculture, le transport, etc. Les réseaux sans fil, quant à eux montrent quelques limites ; grandeur des équipements, négligence d'énergie, le caractère individuel des nœuds du réseau et l'impossibilité de déploiement de ces derniers dans les milieux hostiles. De ce constat, une nouvelle génération de réseaux sans fil est née, elle s'appelle les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs).

Les RCSFs sont des réseaux à hôtes autonomes et à infrastructures non-prédéfinies, utilisés dans des domaines très variés, tels que la détection de flux de radiation, le suivi d'objets en déplacement, ou encore la prévention de catastrophes naturelles.

Un réseau de capteurs sans fil est un type particulier des réseaux ad hoc, il est constitué d'un grand nombre de dispositifs physiques appelés capteurs, pouvant relever des données de l'environnement surveillé et de les transmettre vers une station de base. Les applications de ce type de réseaux sont très diverses, elles incluent le domaine militaire, le contrôle du trafic routier, les espaces sanitaires, le diagnostic industriel et autres.

Les capteurs sont dotés de batteries de taille très réduite, à faible autonomie et qui ne sont pas remplaçables. De ce fait, le réseau doit accomplir sa mission tout en conservant l'énergie des nœuds. Cette dernière est consommée dans trois fonctions : la capture, le traitement et la communication. Plusieurs facteurs interviennent dans ces fonctions, nous citons : le type d'applications, le protocole de routage, la politique d'accès au canal de transmission, etc.

Le but d'un réseau de capteurs est défini par la capacité de faire router une grande quan-

tité d'informations, à une station de base, durant une longue période de temps. Le routage est l'une des problématiques majeures d'un réseau de capteurs.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la couche réseau, où beaucoup de protocoles de routage ont été proposés pour conserver au maximum l'énergie du réseau. Cependant, quelques uns souffrent de la consommation abusive d'énergie. L'objectif de notre travail est donc de proposer un protocole permettant de minimiser la consommation de l'énergie du réseau de capteurs et donc, d'augmenter sa durée de vie.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres, comme suit :

Le premier présente des généralités sur les réseaux de capteurs : leurs architecture, leurs caractéristiques, leurs classifications, les contraintes de conception d'un tel réseau, et leurs domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sont discutées et une classification de ces protocoles conçus pour ce type de réseaux est ainsi présentée. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de quelques mécanismes visant à minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le troisième chapitre est dédié à la description détaillée du protocole que nous avons proposé, après avoir donné un aperçu sur le protocole (SGDF), ainsi qu'une présentation du modèle pour le système à simuler.

Le quatrième chapitre, quant à lui, est consacré à la simulation de notre protocole, dont les résultats de simulation sont retournés afin d'être comparés au protocole SGDF.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés ainsi que des perspectives de recherche dans le domaine en question.

# Chapitre 1

## Généralités et notions de base sur les réseaux de capteurs sans fil

### 1.1 Introduction

L'évolution grandissante des technologies informatiques et des communications sans fil a induit à l'apparition des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), dont les coûts sont bas. Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans le traitement de données à distance, dans des environnements qui peuvent s'avérer hostils. Un tel réseau est constitué d'un grand nombre de dispositifs physiques appelés "capteur" ou "nœud", dont les fonctionnalités se résument à capturer, traiter et communiquer les informations de l'environnement, dans lequel ils sont déployés, à un ou plusieurs points de collecte [1].

Cependant, malgré le bon potentiel des réseaux de capteur, ils sont sujet à de nombreuses contraintes qui sont imposées par les capacités réduites des nœuds de capteurs en tant qu'unité individuelle (puissance basse, capacité de stockage réduite,...etc.).

Dans ce premier chapitre, nous présenterons tout d'abord brièvement les réseaux sans fil et Ad hoc. En outre, nous donnerons les généralités que comportent les réseaux de capteurs sans fil, à savoir, leurs caractéristiques et contraintes mais aussi leurs architectures.

### 1.2 Les réseaux sans fil

Hier encore, restreint au domaine professionnel, les réseaux sans fil, se popularisent et démocratisent en raison des avancées stupéfiantes que connaît le monde de l'électronique et

du traitement du signal. En comparaison avec l'environnement filaire, l'environnement sans fil permet aux utilisateurs d'accéder et de manipuler des informations à travers des unités de calcul mobiles (PC portable, capteur, ... etc.). De plus, avec les avancées récentes, en termes de performances et de miniaturisation, réalisées en microélectronique, les applications liées au traitement mobile sans fil devraient être de plus en plus répandues. En effet, les réseaux sans fil offrent une grande flexibilité d'emploi. En particulier, ils permettent la mise en réseaux de sites dont le câblage serait trop onéreux à réaliser dans leur totalité, voir même impossible dans certains cas.

Les réseaux sans fil peuvent être classés en deux catégories : les réseaux avec infrastructure fixe préexistante, et les réseaux sans infrastructure. Dans la première catégorie, le modèle de communication utilisé est généralement le modèle cellulaire. Dans ce modèle, un point d'accès assure la liaison entre les terminaux mobiles et le réseau câblé, les utilisateurs peuvent se déplacer de manière transparente (sans perte de connectivité) d'un point d'accès à un autre à l'intérieur du réseau. La deuxième catégorie est celle des réseaux ad hoc [2] [3].

## 1.3 Les réseaux Ad-hoc

### 1.3.1 Définition

Un réseau sans fil ad hoc (ou MANET, pour Mobile Ad hoc NETwork) est formé par un ensemble d'hôtes qui s'organisent seuls et de manière totalement décentralisée, formant ainsi, un réseau autonome et dynamique ne reposant sur aucune infrastructure filaire. Ces hôtes peuvent être fixes ou mobiles, mais l'on considère qu'ils sont mobiles dans la plupart des cas. Selon ces hypothèses, tout ensemble d'objets muni d'une interface de communication adéquate est susceptible de spontanément former un tel réseau. Aucune infrastructure n'étant disponible, ces objets ont donc à découvrir dynamiquement leurs environnements.

Un réseau ad hoc étant avant tout un réseau sans fil, les objets communiquent entre eux par le biais d'une interface radio. Ces communications sont donc soumises aux phénomènes physiques qui régissent les ondes radio, telle qu'une forte atténuation du signal avec la distance. Ainsi, seuls les hôtes suffisamment proches les uns des autres sont capables de communiquer directement ensemble, et les communications de longue distance doivent s'effectuer par le biais d'un mécanisme nommé multisautes : cela signifie simplement que certains objets doivent relayer les messages de proche en proche jusqu'à ce que leur acheminement

soit effectué. L'utilisation d'une antenne radio omnidirectionnelle implique également qu'un message envoyé par un émetteur quelconque est reçu par tous les récepteurs suffisamment proches de lui [4] [5].

### **1.3.2 Caractéristiques des réseaux ad hoc**

Les réseaux ad hoc peuvent être facilement installés en un temps réduit, dans les endroits difficiles à câbler, ce qui élimine une partie du travail et du coût généralement lié à l'installation et la mise en route.

Dans ce genre de réseaux mobiles, les nœuds peuvent être déplacés à tout moment et dans n'importe quelle direction dans la zone de couverture radio des stations émettrices, ce qui rend la topologie du réseau dynamique et imprévisible causant la déconnection très fréquente des unités et le fait que les équipements sans fil utilisés sont destinés à être portables, donc à utiliser des batteries, limitent la durée de vie du réseau. Donc un protocole de routage puissant capable de gérer les consommations énergétiques est nécessaire [6].

## **1.4 Les réseaux de capteurs**

### **1.4.1 Définition d'un capteur**

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capables d'effectuer des mesures simples sur leur environnement. Ces mesures peuvent tant concerner la température, la pression de la lumière ou le son et de les transformer en données numériques ; afin de les communiquer par ondes radio à travers le réseau vers un ou plusieurs points de collecte appelés station de base (SB) [7].

### **1.4.2 Architecture d'un nœud capteur**

Un nœud capteur comporte quatre unités principales : de contrôle d'énergie, de captage, de traitement et de communication comme le montre la figure suivante :

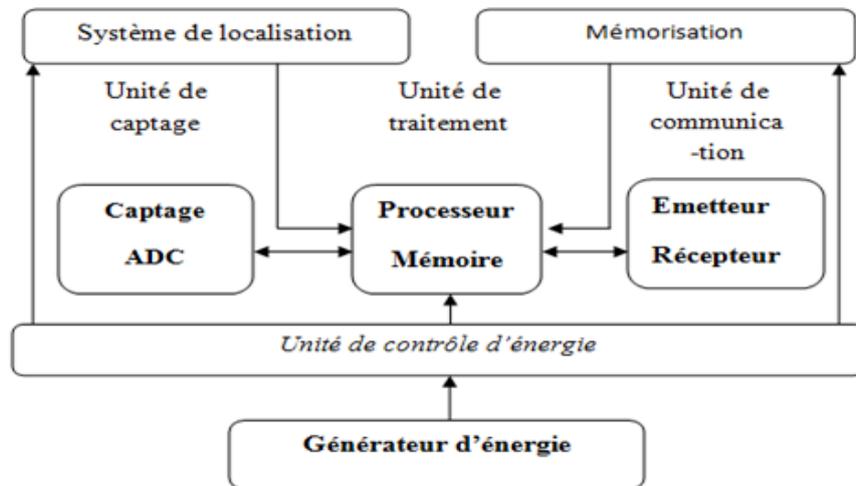


FIGURE 1.1 – Les composants d'un nœud de capteur.

- **L'unité d'acquisition/de captage (*Sensing unit*)** : elle est composée d'un capteur qui va obtenir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique appelé ADC (Analog to Digital Converter) qui va convertir l'information relevée et la transmettre à l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement (*Processing unit*)** : l'unité de traitement 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'une mémoire. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les stocke en mémoire ou les envoie à l'unité de transmission.
- **L'unité de transmission (*Transceiver unit*)** : l'unité de transmission est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.
- **L'unité d'énergie (*Power unit*)** : un des composants les plus importants du nœud capteur est l'unité d'énergie. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des unités de balayage d'énergie telles que les photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique.

En plus des quatre unités, 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 (Global Positioning System). Dans les réseaux de capteurs mobiles, les nœuds doivent se

déplacer, donc un mobilisateur doit faire partie des composants du capteur [8].

### 1.4.3 Définition d'un réseau de capteur sans fil

Plus connus sous le nom de *Wireless Sensor Networks* (WSNs), les réseaux de capteurs sans fil sont considérés comme un type spécial des réseaux Ad hoc ou l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs.

Comme il a été précisé précédemment, les réseaux de capteurs sans fil sont une instance particulière de la classe des réseaux Ad hoc. Cependant, on peut noter quelques différences majeures [9] :

- ▶ En général, le nombre de nœuds dans un réseau de capteurs 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 topologie du réseau change fréquemment (ajout/retrait de nœuds capteurs, mobilité relative d'un nœud).
- ▶ Les nœuds capteurs ont des ressources limitées (puissance de transmission, de calcul, autonomie d'énergie électrique, capacité mémoire).
- ▶ Les nœuds capteurs peuvent ne pas avoir des identificateurs globaux comme dans le protocole IP(Internet Protocol).

### 1.4.4 Architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture. Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter les données et de les router vers une ou plusieurs stations de base. Cette dernière, est un point de collecte de données capturées. elle peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'Internet. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau [7].

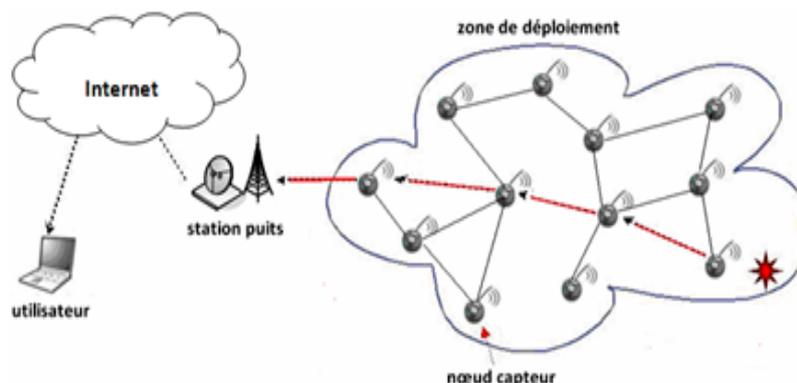


FIGURE 1.2 – Architecture d'un RCSF

### 1.4.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs comprennent plusieurs caractéristiques. Les plus importantes sont [5] [10] :

- **Durée de vie limitée**

les nœuds de capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie du fait qu'ils fonctionnent sans surveillance dans des régions géographiques éloignées. Par conséquent, le rechargement ou le remplacement de leurs batteries devient quasiment impossible.

- **Ressources limitées**

Habituellement les nœuds capteurs ont une taille très petite, ce facteur de forme, limite la quantité de ressources qui peuvent être mises dans ces nœuds, par conséquent, les capacités de traitement et de mémorisation sont très limitées.

- **Bande passante limitée**

En raison de la puissance limitée, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés.

- **Scalabilité**

La surveillance d'un phénomène peut nécessiter le déploiement d'un nombre de nœuds qui est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. N'importe quel schéma de routage doit pouvoir travailler avec ce nombre énorme de nœuds capteurs. Suivant l'applica-

tion, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs. Les nouvelles structures doivent garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs, ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs.

– **Topologie dynamique**

La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide car :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (par exemple un champ de bataille), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Les nœuds capteurs et les nœuds puits peuvent être mobiles.

– **Agrégation des données**

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds capteurs peuvent produire les mêmes données ce qui implique une redondance. Pour remédier à cette lacune, et afin de réduire la largeur de la bande passante, ces réseaux fournissent la possibilité d'agréger les données en les fusionnant en un ensemble d'informations significatives.

### 1.4.6 Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

La taille de plus en plus réduite des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, environnemental, médicale, sécurité et commerciale [11] [12].

#### 1.4.6.1 Application militaire

Le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable pour un tel domaine. Le 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).



FIGURE 1.3 – Les RCSFs dans le domaine militaire.

#### 1.4.6.2 Application dans l'environnement

Des capteurs dispersés à partir d'un avion sur une forêt peuvent signaler un éventuel début d'incendie dans le champ de perception ; ce qui permettra une meilleure efficacité pour la lutte contre les feux de forêt. Dans les champs agricoles, les capteurs peuvent être semés avec les graines. Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, des capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc.) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace.



FIGURE 1.4 – Les RCSFs pour la surveillance des lieux hostiles.

#### 1.4.6.3 Application pour la sécurité

Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, pourraient être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton. La surveillance de voies ferrées pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains

peut être une application intéressante des réseaux de capteurs. La protection des barrages pourrait être accomplie en y introduisant des capteurs. L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats.



FIGURE 1.5 – Les RCSFs dans le domaine de sécurité.

#### 1.4.6.4 Application médicale

La surveillance des constantes physiologiques d'un patient serait possible grâce à des micro-capteurs qui peuvent être implantés sous la peau. L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients, la collecte des informations de meilleure qualité facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies et aussi l'intervention rapide, si les mesures effectuées par les capteurs sont anormales.

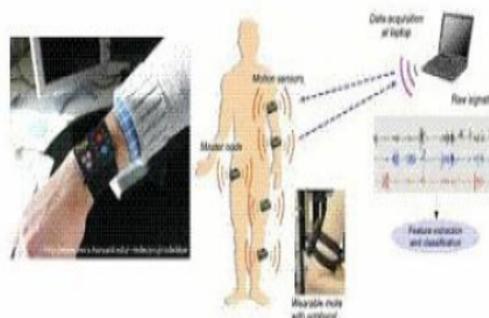


FIGURE 1.6 – Les RCSFs dans le domaine médicale .

#### 1.4.6.5 Application commerciale

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service.



FIGURE 1.7 – Les RCSFs dans le domaine commerciale .

#### 1.4.7 Facteurs et contraintes de conception d'un réseau de capteurs sans fil

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil est influencée par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs. Ils sont également considérés comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine [11].

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs sont illustrés dans ce qui suit :

##### 1.4.7.1 Le facteur d'échelle (scalability)

une des caractéristiques des RCSFs est qu'ils peuvent contenir des centaines voir des milliers de nœuds capteurs. En effet, le réseau doit être capable de fonctionner avec ce nombre de capteurs tout en permettant l'augmentation de ce nombre et la concentration (densité) des nœuds dans une région [13].

### 1.4.7.2 La consommation d'énergie

Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie. Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation [14].

### 1.4.7.3 Topologie du réseau

En raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau [15] :

- **Déploiement** : Les nœuds sont soit répartis de manière prédéfinie, soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion). Il faut alors que ceux-ci s'organisent de manière autonome.
- **Post-Déploiement - Exploitation** : Durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds ou bien à des pannes.
- **Redéploiement** : L'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

### 1.4.7.4 Les contraintes matérielles

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

### 1.4.7.5 La tolérance de fautes

Les nœuds peuvent être sujet à des pannes dues à leur fabrication (produit bon marché, possibilité d'avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment, à un manque d'énergie.

Les interactions extêrnes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption [13].

### 1.4.8 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans les réseaux de capteurs, les noeuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, en n'ayant aucune information sur la topologie globale même locale du réseau construit. Pour cela, les noeuds capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leur permettre de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, réagir aux données perçues et transmettre ces données via une communication multi-sauts à la destination.

#### 1.4.8.1 La pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par une station de base et les noeuds capteurs est présentée dans la figure 1.8. Cette pile intègre les données avec les protocoles de la couche réseau, communique à travers le médium sans fil en conservant l'énergie et favorisant les efforts coopératifs des noeuds [7] [16].

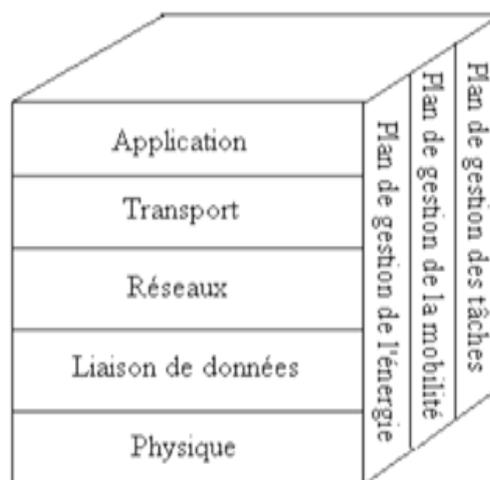


FIGURE 1.8 – La pile protocolaire d'un réseau de capteurs.

- **Couche physique** : la couche physique intervient dans les techniques d'émission et de réception. Elle est responsable de la sélection des fréquences et de la détection d'un signal.
  
- **Couche liaison de données** : cette couche est responsable du multiplexage des flux de données, de l'accès au médium et du contrôle d'erreur. Elle assure une connexion point à point ou point à multipoint fiable dans une communication réseau. Elle est composée d'une couche de contrôle des liens logiques (LLC pour Logical Link Control) et une couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour Médium Access Control).
  - LLC encapsule les segments venant de la couche réseau par l'ajout des en-têtes nécessaires, rassemble et fragmente les trames MAC, gère les erreurs d'adressage.
  - Puisque l'environnement est bruyant et les capteurs peuvent être mobiles, un protocole MAC doit connaître l'état de l'énergie résiduelle et être capable de réduire au minimum les collisions causées par l'émission simultanée des noeuds voisins.
  
- **Couche réseau** : cette couche prend soin de router les données, éventuellement par des communications multi-sauts, fournies par la couche de niveau supérieur.
  
- **Couche transport** : la couche transport est spécialement nécessaire quand le système est planifié à être consulté à travers l'internet. Une approche comme le TCP (Transport Control Protocol) est nécessaire pour interagir les réseaux de capteurs avec d'autres réseaux externes [16].
  
- **Couche application** : selon les tâches de capture, différents types d'applications peuvent être utilisés dans la couche application.
  
- **Le plan de gestion d'énergie** : le plan de gestion d'énergie consiste à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Par exemple, un noeud capteur doit éteindre son interface de réception après avoir reçu un message de ses voisins. Ceci évite la réception des messages dupliqués. Aussi, quand le niveau d'énergie d'un capteur est faible, ce dernier diffuse un message à ses voisins pour ne pas participer au routage des messages et

conserve l'énergie restante à la perception [7].

- **Le plan de gestion de mobilité** : le plan de gestion de mobilité détecte et enregistre le mouvement des nœuds capteurs. Ceci permet à un nœud de maintenir un itinéraire vers un utilisateur et il peut garder trace de l'emplacement de ses voisins. En sachant l'emplacement de ses derniers, un nœud peut équilibrer l'usage de son énergie [7].
  
- **Le plan de gestion des tâches** : le plan de gestion des tâches s'occupe de l'équilibrage et de la distribution des tâches de perception pour une région spécifique. Les nœuds de cette région ne sont pas tous sollicités à exécuter ces tâches au même temps. Cela dépend de la nature du capteur, son niveau d'énergie et de la zone géographique [7].

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

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

En général, deux types de nœuds sont identifiés logiquement : les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteurs), et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds du réseau (nœuds de relais). Les données capturées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi-sauts. Comme illustré dans la figure 1.9, cette organisation logique implique quatre types de communications :

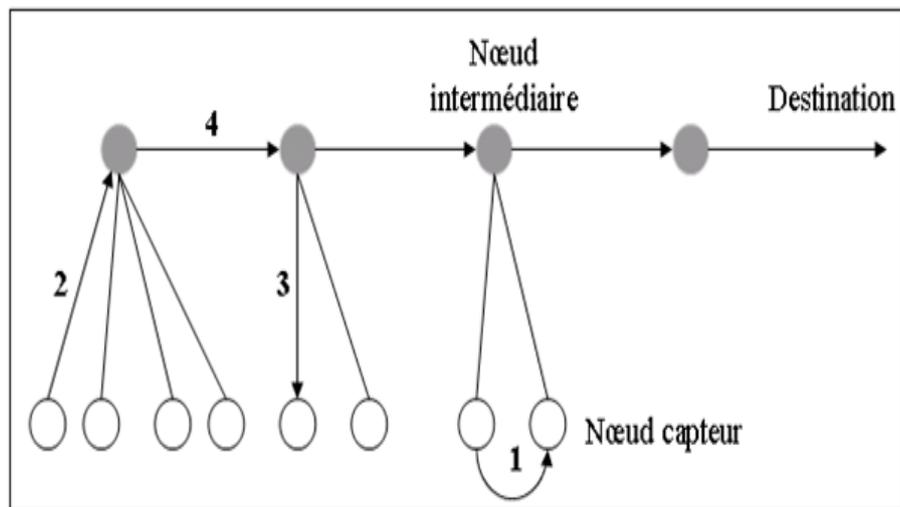


FIGURE 1.9 – Types de communication dans les réseaux de capteurs sans fil.

- *La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur* : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clusterisation (c'est l'organisation du réseau en structure cellulaire) [17].
- *La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire* : les données capturées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.
- *La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur* : les requêtes et la signalisation des messages sont souvent multicast. Elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires pour atteindre un sous-ensemble de nœuds immédiatement (communication directe).
- *La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire* : la communication entre ces nœuds est la plupart du temps unicast [18].

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

## **1.5 Conclusion**

Les réseaux de capteurs sans fil, suscitent un intérêt grandissant compte à l'évolution des technologies de l'information et de la communication, ceci se confirme dans les différents et multiples domaines d'application de ces réseaux de capteurs sans fil, à savoir : les applications militaires, médicales, applications à la sécurité, environnementales et commerciales.

Dans ce chapitre, nous avons introduit et présenté les réseaux de capteurs sans fil en illustrant leurs caractéristiques et contraintes ainsi que leurs domaines d'application. Ce qui représente la base permettant de comprendre notre problématique dans la suite de notre travail.

# Chapitre 2

## Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

### 2.1 Introduction

Le routage consiste à acheminer des données d'une source vers la bonne destination, à travers un réseau de connexion.

Les caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil, comme la densité importante des nœuds, leurs autonomies énergétiques limitées et la topologie qu'ils forment, exigent des protocoles de routage spécifiques, différents de ceux déployés dans les réseaux usuels.

Le développement d'un protocole de routage est une problématique majeure dans les réseaux de capteurs sans fil et ces dernières années, la volonté de mettre en place des réseaux de capteurs en remédiant au problème de l'énergie a permis de proposer plusieurs algorithmes de routage à basse consommation.

### 2.2 Défis du routage dans les réseaux de capteurs sans fil

#### 2.2.1 Déploiement des capteurs

Suivant le type d'application, le mode de déploiement des capteurs peut être déterministe ou aléatoire. Dans le déploiement déterministe, les capteurs sont placés manuellement et les

données sont toujours acheminées via une route prédéterminée et fixe. Quand le déploiement est aléatoire, dit aussi auto-organiser, les nœuds capteurs sont dispersés aléatoirement, créant ainsi une infrastructure ad hoc.

Dans ce cas, si la distribution qui en résulte n'est pas uniforme, le recours à une architecture de groupe optimale s'avère nécessaire afin de permettre une meilleure connectivité, ainsi que des opérations plus efficaces en consommation d'énergie [3].

### 2.2.2 Modèle de livraison de données

Le modèle de renvoi des données captées constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Ce modèle peut, suivant l'application, être continu, orienté événement, orienté requête, ou hybride.

Le modèle de renvoi continu est le mieux adapté aux applications qui nécessitent des rapports périodiques sur l'environnement surveillé. Pour cela, chaque nœud allume ses dispositifs de captage et de transmission d'une manière périodique, capte son environnement puis transmet les résultats dans des intervalles de temps réguliers.

Par contre, dans le modèle de renvoi orienté événement ou requête, les nœuds doivent réagir d'une manière immédiate à un changement brusque dans la valeur de l'attribut capté, ou à une requête générée par le nœud puit. Ce dernier modèle est convenable pour les applications où le temps de réponse des capteurs peut être critique. Une combinaison des trois modèles est également possible, le mode de transmission des rapports est dès lors appelé hybride [19].

### 2.2.3 Hétérogénéité Nœuds/liens

Plusieurs études ont supposé qu'un réseau de capteurs est constitué de nœuds homogènes ayant les mêmes capacités en termes de calcul, de transmission et d'énergie disponible. Cependant, selon l'application, un nœud capteur peut avoir des rôles différents. L'existence d'un ensemble de capteurs hétérogènes soulève beaucoup de questions techniques liées au routage de données.

Par exemple, quelques applications pourraient exiger un mélange de capteurs divers pour surveiller la température, la pression et l'humidité de l'environnement, détectant le mouve-

ment par l'intermédiaire des signatures acoustiques et capturant l'image ou le cheminement visuel des objets mobiles.

Ces capteurs spéciaux peuvent être déployés indépendamment comme ils peuvent inclure des fonctionnalités différentes. Même la capture et la délivrance des données peuvent être produites par ces capteurs à différents taux. Par exemple, les protocoles hiérarchiques indiquent des nœuds " cluster-heads " qui sont différents des nœuds capteurs normaux. Ces cluster-heads peuvent être plus puissants que les autres nœuds capteurs en terme d'énergie, de bande passante et de mémoire. Par conséquent, ces cluster-heads sont chargés de la transmission des données à la station de base [20].

### 2.2.4 Qualité de service

Dans certaines applications, les données captées doivent être acheminées au destinataire durant une certaine période, à compter du moment de leur acquisition, autrement, ces informations ne seront plus utiles. Par conséquent, la garantie d'une latence limitée dans les délais de transmission de bout en bout constitue une contrainte supplémentaire pour ce genre d'applications.

Cependant, il est à noter, que dans plusieurs autres applications, le facteur de conservation d'énergie qui est directement lié à la durée de vie globale du réseau constitue une contrainte plus importante relativement à la qualité des données transmises. Pour cela, et en cas d'épuisement d'énergie, le réseau peut être amené à réduire la qualité des résultats en vue de minimiser la dissipation d'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau. Ceci dit, les protocoles garantissant la qualité de service doivent être également efficaces en consommation d'énergie [15].

### 2.2.5 Agrégation des données

L'une des caractéristiques des réseaux de capteurs est la possibilité de réduire la quantité de données circulant dans le réseau, afin de conserver de l'énergie, en fusionnant les données par des nœuds particuliers du réseau. Ce processus est appelé agrégation de données.

L'agrégation exige, non seulement, la transmission des données mais aussi les messages de contrôle, ce qui impose des contraintes sur l'architecture du réseau. Pendant l'agrégation,

nous devons aussi prendre en considération quelques problèmes : Les erreurs dans les messages, les messages perdus, la redondance des données, la synchronisation entre les nœuds ...etc [3] [21].

### **2.2.6 Dynamicité du réseau et mobilité**

La plupart des architectures considérées dans les protocoles de routage préalablement développés supposent que les nœuds capteurs sont stationnaires, cependant, la mobilité des capteurs ainsi que les nœuds puits sont nécessaires dans plusieurs applications . Router les messages de/vers un nœud en mouvement est plus contraignant, car le facteur de stabilité de la route choisie devient un facteur d'optimisation important, en plus de l'énergie consommée, la bande passante disponible, etc.

De plus, le phénomène capté peut également être, suivant l'application, statique ou dynamique. Par exemple, il est dynamique dans les applications de détection/traque de cibles, et statique pour les réseaux de surveillances de forêts généralement utilisés pour la prévention contre les incendies.

Surveiller des évènements statiques permet au réseau de travailler avec un mode réactif qui consiste simplement à générer un trafic relativement faible. Cependant, un évènement dynamique nécessite dans la plupart des applications l'envoi de rapports périodiques et donc, la génération d'un trafic considérable à router vers les nœuds puits .

## **2.3 Approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil**

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont déployés d'une manière dense où chaque nœud peut avoir plusieurs dizaines de voisins. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage basés sur la communication multi-sauts entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau sont nécessaires.

Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement des routes et l'initiateur de la communication [21].

La figure suivante montre la classification des différentes approches de routage dans les RCSFs selon les critères cités précédemment :

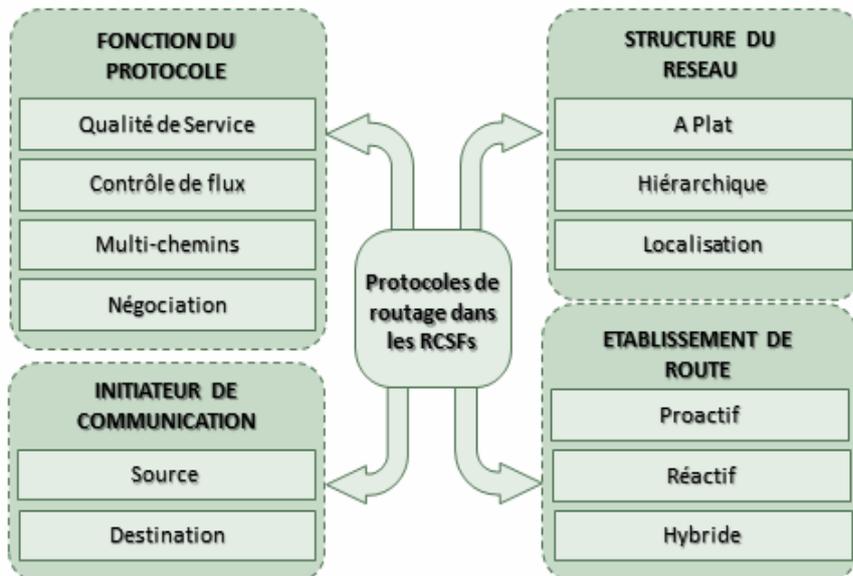


FIGURE 2.1 – Classification des approches de routage dans les RCSFs.

### 2.3.1 Classification selon la structure du réseau

La structure détermine l'organisation des capteurs dans le réseau et joue un rôle significatif dans le fonctionnement du protocole de routage. En générale, le routage dans les réseaux de capteurs sans fil peut être divisé selon la structure du réseau en routage à plat (*Flat based routing*), routage hiérarchique (*Hierarchic based routing/ Clustering based routing*) et routage basé sur la localisation (*Location based routing*) [4] [21].

#### 2.3.1.1 Routage à plat

La première catégorie des protocoles de routage est celle des protocoles de routage à plat multi-sauts (*multihop flat routing*) dont les protocoles sont basés sur le principe centré données "data-centric" [22] où tous les nœuds ont le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. En raison du grand nombre de tels nœuds, il n'est pas possible d'affecter un identificateur global à chaque nœud. Pour pallier cette lacune, un système de dénomination par attribut (*attribute values*) est nécessaire pour spécifier les propriétés des données [23].

##### 1. Flooding (inondation)

La technique du Flooding (Inondation) [24] est une technique classique qui peut être utilisée pour le routage dans les réseaux de capteurs. Dans cette approche, chaque nœud recevant un paquet de données le diffuse à tous ses nœuds voisins, jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint (inondation de tout le réseau).

##### Discussions :

Le Flooding est une technique réactive qui ne nécessite pas une maintenance coûteuse de la topologie du réseau, ni des algorithmes complexes pour la découverte des routes, mais elle présente plusieurs inconvénients tels que : l'implosion, le chevauchement et l'ignorance des ressources d'énergie.

##### 2. Gossiping

Le Gossiping [25] est une amélioration de Flooding où un nœud recevant un message ne le diffuse pas à tous ses voisins, mais il le transmet à un seul, sélectionné aléatoirement. En effet, chaque nœud capteur dans le réseau sélectionne aléatoirement un nœud parmi ses voisins pour lui transmettre les données reçues, une fois que le

nœud voisin reçoit ces données, il choisit un autre nœud d'une façon aléatoire pour lui expédier ces données à son tour, jusqu'à ce que les données atteignent la station de base.

**Discussion :**

Bien que l'approche évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud, elle prend beaucoup plus de temps pour propager les messages dans tout le réseau.

3. ***SPIN (Sensor protocols for Information via Negotiation)***

SPIN (*Sensor Protocol For Information Negotiation*) [26] est l'un des premiers protocoles développés pour les réseaux de capteurs sans fil. Il représente une amélioration du protocole FLOODING, il est aussi considéré comme étant le premier protocole centré données, qui adopte un mécanisme de négociation pour éliminer la duplication des données reportées. Ceci dans le but de préserver l'énergie des nœuds, et éventuellement celle du réseau.

SPIN consiste à remédier au problème de la non prise en compte des ressources, posé dans FLOODING, en utilisant la négociation et l'adaptation aux ressources disponibles. Le problème de l'implosion est aussi remédié à l'aide d'un mécanisme de négociation entre les nœuds capteurs avant la transmission. Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV (Analog to Digital Converter) contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ (REQuest for data) vers son voisin.
- En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée.

**Discussions :**

L'un des avantages majeurs du protocole SPIN dérive de son traitement localisé de l'information, où chaque nœud n'a besoin de connaître que ses voisins directs. Ceci permet de préserver les mêmes performances lors d'un changement fréquent de la topologie du réseau. Le mécanisme de négociation permet à SPIN de réduire le taux de données redondantes transmises.

Ce protocole rencontre certains problèmes, le mécanisme d'annonce des messages ADV, peut dans certains cas ne pas garantir une délivrance fiable des données de la

source vers la destination, lorsque les nœuds intéressés par la donnée se trouvent loin de la source, et les nœuds entre la source et la destination, ne sont pas intéressés par la donnée. Par conséquent, SPIN, ne peut être un choix convenable pour les applications qui exigent un acheminement efficace des données captées, telles que les applications militaires.

#### 4. La diffusion dirigée (DD : *Directed Diffusion*)

Cet algorithme est basé sur le paradigme de dissémination de données, où le nœud puit diffuse son intérêt, qui présente une description des tâches affectées à tous les nœuds capteurs du réseau, telle qu'il est montré dans la figure 2.2 (a). Ces descriptions englobent des paires d'attributs qui décrivent les tâches requises par le nœud puit. Chaque nœud capteur stocke dans son cache une entrée d'intérêts, cette entrée contient un champ d'estampille et d'autres champs gradients. Comme l'intérêt est propagé à travers le réseau, les gradients à partir du nœud source de données vers le nœud puit seront déterminés (Figure 2.2 (b)). Quand des données seront disponibles au niveau du nœud source, il les envoie au nœud puit suivant le chemin ayant un gradient fort pour l'intérêt diffusé comme illustré dans la figure 2.2 (c)[4] [15].

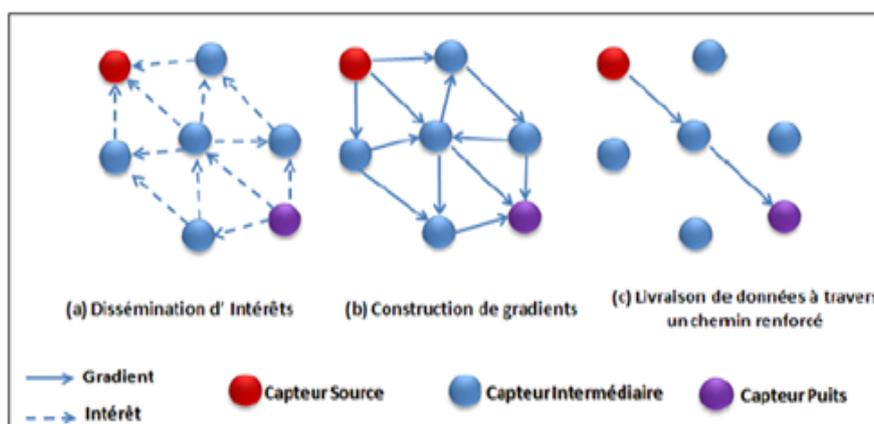


FIGURE 2.2 – Le protocole diffusion dirigée.

**Discussion :**

La diffusion dirigée présente de nombreux avantages du fait qu'elle évite l'adressage global et la nécessité d'une identification des nœuds, ainsi que la consommation en termes de mémoire qui est relative à la consommation de l'énergie. Cependant, ce protocole n'est pas toujours adaptable à toutes les applications des réseaux de capteurs, des difficultés sont rencontrées dans le domaine de surveillance qui nécessite une fourniture continue de données.

**5. SGDF (*Single Gossiping with Directional Flooding routing protocol*)**

Proposé par Yen et al [27] pour résoudre les problèmes de Flooding. Il est constitué de deux étapes :

**– La première étape (Initialisation de la topologie du réseau) :**

Une fois les capteurs déployés aléatoirement, le sink diffuse un message "Hello" à ses voisins. Ce message contient trois champs : l'adresse du sink, le nombre de sauts, et le seuil TH (Threshold)(nombre compris entre 0 et 1 pour décider dans la phase de routage s'il utilise le mode Flooding). Les capteurs voisins recevant ce message sauvegardent l'adresse du sink et le nombre de sauts. Si un capteur n'a pas déjà reçu le message, il garde le nombre de sauts comme gradient en l'incrémentant de 1, après quoi, il va créer un nouveau message qui sera envoyé en broadcast à tous ses voisins. Si un capteur recevant un message avait un gradient, il compare le nombre de sauts du message avec son gradient et sauvegarde le plus petit. Cette étape se termine lorsque tous les nœuds ont reçu le message au moins une fois, tel qu'à la fin chaque capteur aura un gradient qui détermine le nombre de sauts pour atteindre le sink.

**– Deuxième étape (De routage) :**

Après l'initialisation du réseau, l'étape de routage commence.

À la détection d'un événement, le nœud initiateur diffuse un message de demande d'informations (adresse et gradient) à ses voisins, ainsi, il choisi aléatoirement parmi ceux dont le gradient est inférieur à lui pour être le prochain à recevoir le paquet. Les voisins non choisis (dont le gradient est inférieur à celui de la source) génèrent un nombre aléatoire. Si ce dernier est inférieur à celui généré dans la phase d'initialisation, alors ils diffusent le paquet en mode flooding directionnel. Les étapes précédentes sont reproduites jusqu'à ce que la station de base reçoit le paquet.

### **Discussion**

Ce mode de routage évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud. Aussi, ce protocole ne permet pas le bouclage infini qui est produit par le choix aléatoire des voisins (si le choix aléatoire est utilisé comme seul mode de routage).

Cependant, ce protocole prend beaucoup de temps pour acheminer l'information de la source à la destination et la technique de choix des routeurs ne prend pas en compte le paramètre énergie, donc peut affaiblir certains capteurs plus vite.

### **Avantages du routage à plat**

- Scalabilité : les réseaux à plat sont scalables du fait que tous les nœuds du réseau ont les mêmes rôles et participent similairement au routage des données capturées. Ainsi, les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- Les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, puisque les nœuds communiquent entre eux sans avoir appel à un intermédiaire.
- L'agrégation des données s'effectue par les nœuds capteurs en éliminant les redondances sur les messages qui proviennent des nœuds voisins.

### **Inconvénients du routage à plat**

- Les nœuds qui entourent un nœud puits consomment beaucoup plus d'énergie que les autres nœuds, car le trafic le plus élevé dans un réseau se trouve autour des nœuds puits.

#### **2.3.1.2 Routage hiérarchique**

Dans cette architecture, il y a la notion de cluster. Le réseau est subdivisé en clusters et chaque cluster est constitué de capteurs simples et d'un capteur leader (figure 2.3). Seul le cluster-head (appelé aussi capteur leader ou encore capteur chef) communique avec les autres capteurs ou avec la station de base. Tous les capteurs d'un cluster envoient les données au cluster-head [28].

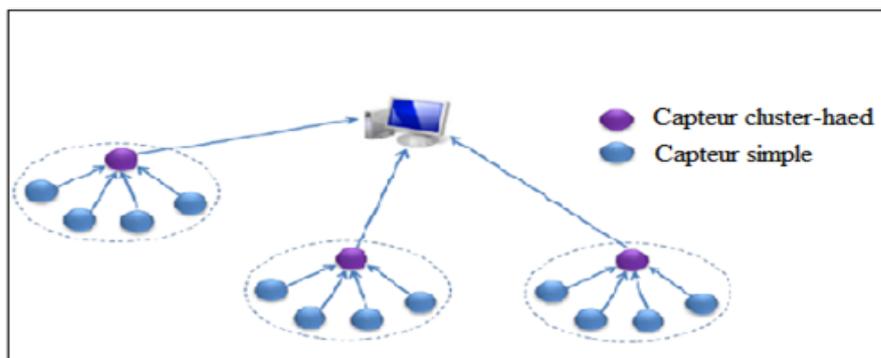


FIGURE 2.3 – Topologie hiérarchique.

### 1. LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

Heinzelman et *al* ont proposé le protocole LEACH [29] comme un nouveau protocole de routage efficace et qui minimise la consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs. LEACH choisit aléatoirement les nœuds cluster-heads et attribue ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin i.e. tour à tour pour garantir une dissipation équilibrée d'énergie entre les nœuds.

Dans le but de réduire la quantité d'informations transmise à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les nœuds membres qui appartiennent à leur propre cluster, et envoient un paquet agrégé à la station de base. LEACH est exécuté en deux phases : la phase d'installation (set-up) et la phase d'état-stable (steady-state phase).

Dans la première phase, les cluster-heads sont sélectionnés et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base aura lieu. Durant la première phase, le processus d'élection des cluster-heads est déclenché pour choisir les futurs cluster-heads.

Ainsi, une fraction prédéterminée de nœuds "p" s'élisent comme cluster-heads selon le schéma d'exécution suivant : durant une période  $r$ , un nœud  $u$  choisit un nombre aléatoire  $r_u$  dont la valeur est comprise entre 0 et 1 ( $0 \leq r_u \leq 1$ ). Si  $r_u$  est inférieur à une valeur seuil  $T(u)$  alors le nœud  $u$  deviendra cluster-head durant la période courante soit  $r$  cette période, sinon le nœud  $u$  devrait rejoindre le cluster-head le plus proche dans son voisinage. La valeur seuil  $T(u)$  est calculée comme suit :

$$\begin{cases} \frac{P}{1-P(r \bmod (\frac{1}{P}))} & \text{Si } i \text{ n'a pas été élu routeur durant les } 1/P \text{ dernières rondes ;} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

Où

$p$  : le pourcentage de cluster-heads dans la plupart des cas  $p = 5\%$ ,

$r$  : la période courante.

### Discussions :

LEACH est capable de conserver la consommation d'énergie des nœuds et d'augmenter la durée de vie du réseau, mais cela est fait sous certaines suppositions :

LEACH suppose que tous les nœuds peuvent transmettre des données avec une grande puissance pour atteindre la station de base. Par conséquent, LEACH n'est pas souhaitable pour les réseaux déployés dans de vastes régions. En outre, LEACH choisit aléatoirement la liste des cluster-heads et il ne pose aucune contrainte sur leur distribution ainsi que sur leur niveau d'énergie. D'où, les cluster-heads peuvent se concentrer dans un même endroit et par conséquent, il pourrait exister des nœuds isolés (sans cluster-head). D'autre part, dans LEACH, l'agrégation des données est centralisée ainsi qu'elle est exécutée périodiquement. Or, dans certains cas, la transmission périodique des données pourrait ne pas être nécessaire et par la suite elle pourrait épuiser rapidement l'énergie limitée des capteurs.

### 2. PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information System*)

PEGASIS [30] est un autre protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs, il a été proposé comme amélioration au protocole LEACH. L'idée principale de PEGASIS est de former une chaîne entre les nœuds. Dans ce protocole, un nœud peut seulement communiquer avec son voisin le plus proche, et doit attendre son tour pour pouvoir transmettre à la station de base. Le nœud capteur doit trouver son voisin le plus proche par l'envoi d'un signal et l'atténuation graduelle de ce dernier, jusqu'à ce qu'il soit reçu par un seul nœud. De ce fait, la chaîne sera formée, elle doit contenir automatiquement des nœuds qui sont les plus proches les uns des autres, et qui forment un chemin vers la station de base.

Le protocole PEGASIS cible deux objectifs principaux : le premier consiste à augmenter la durée de vie du réseau via l'utilisation de techniques collaboratives. Le deuxième est de réduire la bande passante consommée en favorisant les communications locales entre les nœuds les plus proches entre eux.

### Discussion :

PEGASIS améliore l'algorithme LEACH par l'élimination de l'overhead nécessaire pour la

formation dynamique des clusters. Il limite le nombre de transmissions et de réceptions entres les nœuds, et utilise une seule transmission vers la station de base par itération. Il assure la robustesse du réseau, où les capteurs qui épuisent leur énergie sont positionnés à des endroits distribués aléatoirement.

### 3. EDARP (*energy and distance-aware routing protocol*)

EDARP [31] est un protocole pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs. Il réalise une bonne performance en termes de durée de vie en équilibrant la charge de l'énergie parmi tous les nœuds. EDARP introduit un facteur de regroupement nouveau pour l'élection du cluster head (tête de groupe), qui peut mieux gérer les capacités énergétiques hétérogènes. En outre, il introduit également une approche simple mais efficace, à savoir, l'arbre flou couvrant pour l'envoi de données agrégées à la station de base.

EDARP utilise la formule suivante pour sélectionner le cluster head

$$CHS = \frac{RE_{vi}}{\sum_{j=1}^k \frac{Dis_{vj}}{RE_{vj}}}$$

L'algorithme EDARP se divise en deux phases :

Phase d'élection des clusters head dans des zones bien définies :

- En premier lieu chaque nœud diffuse un message Ech\_Msg à tous ses voisins de la même zone.
- Une table de voisinage est établie contenant les informations des voisins.
- Le CHS est calculé pour élire les clusters head de chaque zone.

Phase de construction de l'arbre de routage pour acheminer l'information :

- La station de base envoie un message Crt\_Msg qui contient les critères de décision.
- Chaque chef d'une zone diffuse les critères appropriés (FEN) (l'identifiant du nœud et numéro de l'élection), il le compare à celui de ses voisins chefs. Celui dont cet identifiant FEN est supérieure il sera considéré comme père. Ainsi de suite jusqu'à arrivé à la racine. De ce fait, un arbre est bel et bien construit.

### Discussions :

EDARP est un algorithme qui limite le nombre de transmissions et de réceptions entres les nœuds, et utilise une seule transmission vers la station de base à travers l'arbre flou. Ainsi, il augmente la durée de vie des capteurs grâce au choix des têtes de clusters qui porte sur ceux qui ont une plus grande énergie résiduelle. Cependant, EDARP affiche un surcôt énergétique, causé par la construction de l'arbre.

### Avantages du routage hiérarchique

- Agrégation : les données qui sont collectées à partir d'un ensemble de nœuds d'un cluster peuvent être fusionnées par un cluster-head et par la suite envoyées vers la destination.
- Délais réduits, car plusieurs chemins formés par les cluster-heads sont toujours disponibles.

### Inconvénients du routage hiérarchique

- Non scalable : les protocoles hiérarchiques souffrent du problème de passage à l'échelle, puisque le nombre de cluster-heads augmente au fur et à mesure que la taille du réseau augmente.
- Exigences matérielles : les cluster-heads consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau, ce qui nécessite des nœuds avec une grande capacité en énergie/ portée de transmission.
- Condition physique : plusieurs protocoles n'exigent que les nœuds cluster-head aient des ressources énergétiques plus élevées que les autres nœuds dans le réseau.

#### 2.3.1.3 Routage basé sur la localisation

La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En général, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisque il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en terme d'énergie.

Par exemple, si la région à servir est connue en utilisant la localisation des nœuds capteurs pour diffuser la requête seulement à cette région particulière, alors il est facile d'éliminer le nombre de transmission de manière significative [32] [33] [34].

##### 1. MFR (*Most Forward within Radius*)

Dans [35], les auteurs ont proposé le premier protocole de routage basé sur la localisation, appelé MFR. Dans MFR, chaque nœud recevant un message le transmet

à l'un de ses voisins, sélectionné en fonction de sa position (figure 2.4). Le voisin dont la projection orthogonale est la plus proche de la station de base est choisi. Le processus continu tant que le paquet n'a pas atteint sa destination finale (station de base).

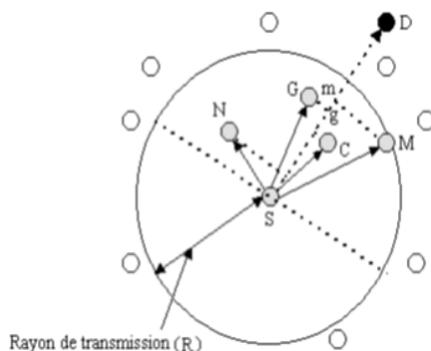


FIGURE 2.4 – Fonctionnement de MFR.

Dans la figure 2.4, le nœud G est le plus proche de la station de base, mais le nœud source (S) envoie son paquet au nœud M, car ce dernier a une projection (m) sur l'axe SD plus proche de la destination (D).

#### Discussion :

Dans le cas où un nœud cherche à transmettre un message et ne trouve aucun voisin dans la direction de la station de base, il transmet son paquet au nœud le plus proche en arrière (un nœud ne peut transmettre à lui même). Au cas où il n'y aurait aucun nœud dans le rayon de transmission (R), le paquet sera perdu. MFR peut ne pas réduire au minimum la distance parcourue par le paquet pour atteindre sa destination, car sa vision est limitée au rayon R.

## 2. GAF (*Geographic Adaptive Fidelity*)

GAF [36] est un protocole de routage basé sur la localisation. Il consiste à diviser la zone de captage en grilles virtuelles à travers lesquelles l'information sera transmise par sauts jusqu'à la destination. Un système GPS (*Global Positioning System*) est utilisé pour repérer les capteurs à l'intérieur des grilles. Les capteurs appartenant à une même grille sont dits équivalents, et n'ont pas besoin d'être à l'état "actif" en même temps, pour cela dans une même grille, si un capteur est actif alors les autres doivent être mis en veille afin d'économiser leurs énergies.

#### Discussion :

Le protocole GAF prend en charge la mobilité des nœuds et essaye de maintenir la connectivité du réseau en laissant un nœud représentatif à l'état actif dans

chaque zone de la grille virtuelle. Les résultats de simulation [36] ont montré que ses performances en terme de délais de transmission et perte de paquets sont comparables à celles d'un acheminement ordinaire dans les réseaux Ad hoc, cependant une amélioration est constatée quand à la durée de vie globale du réseau. Bien que GAF est basé sur la localisation, ce protocole peut être considéré également comme hiérarchique où la formation des groupes (zones de la grille) est basée sur les positions des nœuds. Pour chaque zone particulière de la grille, le nœud actif agit comme un leader de groupe responsable de la transmission des données vers d'autres nœuds du réseau.

### **Avantages du routage basé sur la localisation**

- L'application des systèmes de positionnement, tels que le GPS facilite le contrôle de la topologie et celui de la puissance de transmission des capteurs.
- Dans le routage basé sur la localisation géographique, la région de captage est connue et les requêtes peuvent être donc dirigées uniquement vers cette région, ce qui éliminera le nombre de transmission de manière significative.
- Avec les informations de positionnement, le réseau minimise l'énergie grâce à la facilité du calcul des routes énergétiquement optimales.

### **Inconvénients du routage basé sur la localisation**

- Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- Le routage basé sur la localisation géographique n'est pas un bon choix pour les applications qui exigent une livraison fiable à des intervalles réguliers des paquets de données.
- Le positionnement dépend de la ligne de vision, et la topographie de la surface.

## **2.3.2 Classification selon les fonctions des protocoles**

Les protocoles de routage peuvent être classés selon leur fonctionnement en quatre catégories :

- Routage avec qualité de service QoS ;
- Routage avec contrôle de flux de données ;
- Routage basé sur la négociation ;
- Routage multi-chemin.

### 2.3.2.1 Routage basé sur la QoS

Dans les protocoles de routage basés sur la QoS (Qualité de Service) [4], le réseau bascule entre l'énergie et la qualité des données transmises. En particulier, le réseau satisfait certaines métriques de QoS (délais, énergie, bande passante, etc.).

#### **SPEED (*A stateless protocol for real-time communication in sensor networks*)**

SPEED est un protocole proposé dans [37], afin d'assurer certaines métriques de qualité de service lors du routage de données dans les réseaux de capteurs. Pour acheminer les données en temps réel, avec des délais de bout en bout acceptables, ce protocole maintient des informations de voisinage au niveau de chaque nœud, et utilise une technique de renvoi géographique (geographical forwarding) pour la construction des routes employées. De plus, SPEED essaye de garantir une certaine vitesse de transmission pour chaque paquet dans le réseau. Ainsi, chaque application peut estimer, avant l'utilisation du protocole, les délais de bout en bout offerts, en divisant la distance qui sépare les capteurs sources du nœud puit par la vitesse des paquets.

**Discussion :** SPEED contient des techniques qui permettent d'éviter les congestions du réseau. Cependant, il est à noter que le protocole SPEED ne considère aucune métrique pour l'optimisation en consommation d'énergie.

#### **Avantages du routage basé sur la QoS**

- La qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions.
- Répartition du trafic, d'une part, en équilibrant la charge en énergie, et d'autre part, en évitant les liens défectueux.
- Augmentation du taux d'arrivée des paquets à la station de base.
- En général, les protocoles développés dans cette approche essayent de garantir une vitesse de transmission des paquets constante dans tout le réseau.

#### **Inconvénients du routage basé sur la QoS**

- Le temps mis pour la découverte du chemin augmente le délai de bout en bout, chose non tolérable surtout pour les trafics très urgents.
- Pas de prise en charge de la sécurité qui est l'un des critères de la QoS.

### 2.3.2.2 Routage avec contrôle de flux de données

Dans ce type de routage, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux avec lequel les paquets sont produits par les différents nœuds [38] [39].

#### **Avantages du routage à contrôle de flux :**

- L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.
- La durée de vie du réseau est présentée comme une fonction générale de tous les nœuds, dont l'objectif est de maximiser les durées de vie élémentaires des capteurs.
- Répartition du trafic de façon à assurer l'équité en consommation d'énergie entre les nœuds.

#### **Inconvénients du routage à contrôle de flux :**

- Les protocoles ne précisent pas comment les chemins sont établis.
- Des informations sur la topologie du réseau sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grande échelle.
- L'adaptation du trafic à l'énergie résiduelle des capteurs n'est pas dynamique. En effet, dans le cas où un paquet trouve un nœud qui possède des voisins épuisés, ce paquet ne peut pas changer son itinéraire fixé par la source.

### 2.3.2.3 Routage basé sur la négociation

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles [40].

#### **Avantages du routage basé sur la négociation :**

- le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises et des prises de décisions adéquates suivant les ressources énergétiques disponibles des nœuds.
- L'agrégation utilisée dans les protocoles basés sur la négociation réduit la largeur de la bande passante.

#### **Inconvénients du routage basé sur la négociation :**

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

- Le scénario de négociation entre les nœuds (déterminer les données et les acheminer) produit un retard pour délivrer les données au nœud puit.

#### 2.3.2.4 Routage multi-chemin

Dans ce type de protocoles, la source et la destination sont reliées par des chemins multiples plutôt qu'un simple chemin afin d'augmenter la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire est défaillant. Ceci peut être augmenté en maintenant les chemins multiples entre la source et la destination aux dépend d'une consommation d'énergie et d'une génération du trafic. Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents [40] [41].

**EBMR ( *Energy-Balancing Multipath Routing* ) :** EBMR [42] est un protocole qui utilise le multi trajet en alternance pour prolonger la durée de vie du réseau. EBMR utilise le principe (Client / Serveur) semblable à celui des architectures logicielles. En EBMR, la station de base fait la découverte de route ainsi que la maintenance de la route sélection. Au lieu d'un seul chemin, la station de base sélectionne périodiquement un nouveau chemin à partir de multiples en fonction du niveau d'énergie actuel des nœuds le long de chaque chemin.

EBMR comporte deux phases :

- **Phase de construction de topologie :** Pour lancer la construction de topologie, la station de base diffuse un paquet ND (Discovery Voisins) à l'ensemble du réseau. Chaque nœud reçoit ce paquet et fait les étapes suivantes :

- Enregistre l'adresse du dernier nœud à partir duquel il reçoit le paquet et la stocke dans la liste de voisins dans l'ordre croissant du temps de réception.
- Change l'adresse source du paquet par sa propre adresse.
- Quand un nœud reçoit un paquet ND, s'il a déjà reçu, il ne le rediffuse pas. Sinon il le retransmet à ses voisins.

Après l'achèvement de la découverte des voisins, la station de base diffuse un autre paquet NC pour collecter les informations de chaque nœud voisin. Lorsqu'un nœud capteur reçoit le paquet NC, il répond par un paquet RCN (Répondre Collection Voisins) par inondation. À la fin, la station de base a une vision de la topologie du réseau à travers l'information voisin de tous les nœuds.

- **Phase de transmission des données** : la transmission des données se déroule comme suit :

- La station de base diffuse une enquête DE (*Data Enquiry*).
- Les nœuds de capteurs qui la satisfont répondent avec un paquet DER (*Data Enquiry Reply*).
- Les Nœuds de capteurs qui ne satisfont pas l'enquête rediffusent un DE.
- La station de base calcule un plus court chemin vers le nœud souhaité dans le graphe pondérée.

**Discussions** : Le protocole EBMR appartient à la classe des protocoles de routage multi trajet, il est différent des protocoles de routage proposés par trajets multiples dans les méthodes d'établissement, sélection et de maintien des chemins de routage. L'avantage de EBMR est de trouver un chemin d'un nœud source à la station de base de manière à minimiser la consommation d'énergie et à augmenter la durée de vie du réseau. Le protocole EBMR présente quelques inconvénients tels que, les nœuds doivent être fixes, donc la mobilité des nœuds n'est pas permise, et les nœuds voisins de la station de base peuvent consommer leur énergie très rapidement puisqu'ils seront les plus interrogés.

#### **Avantages du routage multi-chemin**

- Un mécanisme d'équilibre de charge peut être utilisé pour la répartition du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des nœuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens.
- Permet de maintenir plusieurs chemins consommant moins d'énergie pour router les données vers les destinations

#### **Inconvénients du routage multi-chemins**

- Le risque de perte des paquets augmente dans le cas où ces derniers sont envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.
- L'utilisation de plusieurs chemins nécessite de les maintenir, ce qui consomme énormément d'énergie.

### **2.3.3 Classification selon l'établissement de la route**

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

### 2.3.3.1 Protocole proactif

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Pour ce faire, les nœuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes.

#### 1. m-EVBT "modify Energy-aware Virtual Backbone Tree"

L'algorithme m-EVBT [43] est une amélioration du protocole EVBT [44]. Ce dernier utilise une structure d'arbre sur le backbone (colonne vertébrale), dans le but de minimiser la consommation d'énergie dans un transfert de données, entre un nœud capteur et un nœud de l'arbre, mais il a été constaté que cet algorithme ne minimise pas l'énergie le long de tout le processus de routage. De ce constat, la version modifiée (m-EVBT) a été proposée, elle consomme moins d'énergie que la version initiale.

La génération de l'arbre commence lorsque la station de base diffuse une requête ECR sur sa portée. Les nœuds capteurs qui reçoivent un paquet ECR décident s'ils doivent appartenir à cet arbre. La norme utilisée dans la présente décision est un indicateur de remise en forme ' $f_i$ '. Pour ce faire, chaque nœud calcul son propre  $f_i$ . Et attend un délai ' $td$ ', s'il ne reçoit pas un autre ECR avant  $td$ , le nœud devrait appartenir à l'arbre, et détermine que le nœud qui a envoyé le paquet ECR est un lien upstream. En revanche, si le nœud reçoit un autre paquet ECR avant  $td$ , le nœud n'appartiendra pas à l'arbre. Les désignations suivantes sont utilisées pour expliquer m-EVBT :

White (Blanc) pour les nœuds qui n'ont jamais reçu le paquet ECR, Black (Noir) pour les nœuds qui appartiennent à l'arbre, Gray (Gris) pour les nœuds qui ont reçu le paquet ECR mais pour les quel  $td$  n'est pas encore en place et Blue (Bleu) pour les nœuds qui n'appartiennent pas à l'arbre.

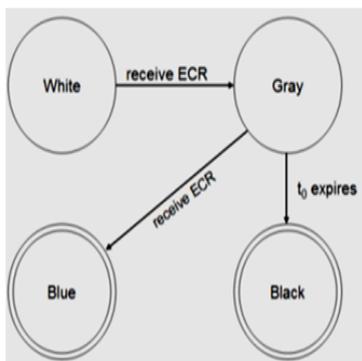


FIGURE 2.5 – Diagramme d'état des nœuds.

Avant de générer le m-EVBT, tous les nœuds de capteurs sont de couleur blanche. Après avoir généré le m-EVBT, tous les nœuds de capteurs sont en noir ou bleu, la figure 2.5 montre le diagramme d'état des nœuds. La différence par rapport à l'algorithme EVBT, le paquet dans l'algorithme m-EVBT comprend l'information sur la consommation d'énergie des nœuds noirs et le nœud sink. L'algorithme m-EVBT est comme suit :

- À l'état initial, le nœud est un nœud puits noir et diffuse le paquet ECR.
- Les nœuds blancs qui ont reçu des paquets (ECR) deviennent des nœuds gris. Ces nœuds calculent  $f_i$ , et attendent un délai  $t_d$ . Ils indiquent également le nœud qui transmet le paquet ECR à leurs liens upstream.
- Si un nœud gris reçoit un autre paquet ECR, il devient un nœud bleu.
- Si un nœud gris ne reçoit pas un paquet ECR au cours du délai  $t_d$ , il devient un nœud noir.
- Si un nœud bleu reçoit un autre paquet ECR, il indique qui est le nœud le plus efficace en énergie à son nœud en amont en utilisant les informations d'énergie cumulée enregistrées dans le paquet ECR.

**Discussion :** Le fait est que les routes soient établies à priori par la construction de l'arbre, facilite l'acheminement des données et optimise les temps de livraison des données le long de l'arbre. Cependant, la construction de l'arbre génère une consommation d'énergie supplémentaire, causant ainsi, la réduction de la durée de vie du réseau.

## 2. EOLSR "Energy-aware routing in wireless ad hoc and sensor networks"

L'idée consiste à réduire l'énergie dépensée dans la transmission d'un paquet à partir de sa source à sa destination, tout en évitant les nœuds avec une faible énergie résiduelle.

La solution proposée, appelée EOLSR [45], est basée sur le protocole de routage OLSR [46]. Il comprend un modèle d'énergie et trois algorithmes : sélection des relais multi-point d'énergie conscients, le calcul d'itinéraires économes en énergie et les émissions optimisées.

L'idée principale pour les émissions optimisées est d'utiliser les nœuds MPR avant de diffuser des messages et des EMPRS des nœuds intermédiaires sur les routes. Par conséquent, l'optimisation des émissions de réseau utilisé dans le protocole EOLSR pour optimiser les inondations du réseau est gardée par le biais de la règle de transfert suivante :

Un nœud transmet un message de diffusion avec un temps à vivre, si et seulement si elle a reçu ce message pour la première fois à partir d'un nœud qui l'a choisi comme MPR.

#### **Discussion :**

Le protocole EOLSR est un protocole basé sur l'économie d'énergie. EOLSR se base sur un modèle énergétique tel qu'il sélectionne l'énergie et sensibilise les relais multi-points (EMPRS), il calcule les routes économes et optimise la diffusion. Cependant, ce protocole nécessite une périodicité des messages plus efficace dans le but d'améliorer ses applications.

#### **Avantages du routage proactif**

- Les routes sont établies à priori, ce qui facilite l'acheminement des données.
- Les protocoles proactifs optimisent les délais de livraison.

#### **Inconvénients du routage proactif**

- Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées.
- Les nœuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes.
- Le nombre élevé de paquets de contrôle diffusé périodiquement dans le réseau risque d'avoir une inondation importante.

#### **2.3.3.2 Protocoles réactifs**

Les protocoles de routage réactifs maintiennent des routes à la demande. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte est lancée. Une fois que la route

n'est plus utilisée, elle sera immédiatement détruite ce qui permet une conservation d'énergie [3].

#### **Avantages du routage réactifs**

- Ils sont bien adaptés dans les réseaux à grande échelle.
- Consommation énergétique réduite.

#### **Inconvénients du routage réactifs**

- Le routage à la demande génère une lenteur à cause de la recherche des routes, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives.
- Ce type de protocole est très coûteux en transmission de paquets lors de la détermination des routes.

#### **2.3.3.3 Protocoles hybrides**

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour avoir connaissance du proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts). Au delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes [3].

#### **Avantages du routage hybrides**

- Les protocoles hybrides choisissent les chemins selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application.

#### **Inconvénients du routage hybrides**

- La recherche des routes est complexe.

### **2.3.4 Classification selon l'initiateur des communications**

La communication dans un réseau de capteurs peut être initiée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires [47].

#### **2.3.4.1 Communication lancée par la source**

Dans un protocole où la communication est initiée par un capteur source, les nœuds envoient des données à la station de base quand ils détectent une variation sensible des paramètres à surveiller. Ces protocoles utilisent des modèles de livraison de donnée dirigés

par les évènements ou dirigés par le temps (périodiques). Soit la donnée est envoyée à un intervalle de temps régulier ou alors, elle est envoyée quand les capteurs capturent une certaine valeur (détection d'un évènement) [47].

### **Avantages**

- L'efficacité énergétique due à l'absence des requêtes générées par le nœud puit, qui consomment beaucoup d'énergie.

### **Inconvénients**

- Dans cette famille de protocoles, l'énergie n'est pas la seule préoccupation, des exigences de QoS doivent en général être respectées (latence, fiabilité).
- Les capteurs doivent avoir des informations sur les chemins qui conduisent au nœud puit.

#### **2.3.4.2 Communication lancée par la destination**

Les protocoles où la communication est initiée par les destinations, utilisent un modèle de livraison de donnée basé sur les requêtes. Les nœuds sources répondent aux requêtes envoyées par la destination [47].

### **Avantages**

- L'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puit élimine les transmissions inutiles.

### **Inconvénients**

- La circulation de messages requêtes de grande taille tend à épuiser les batteries des capteurs.
- Il y a un surcout dans ce type de protocoles puisque les requêtes sont d'abord diffusées dans tout le réseau (inondation de tout le réseau).

## **2.4 Mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil**

L'énergie totale consommée par un nœud capteur a pour origine trois fonctions principales : la capture, le traitement et la communication des données [48]. Dans ce qui suit, nous allons citer quelques mécanismes visant à minimiser l'énergie de capture, de traitement et de communication dans les réseaux de capteurs sans fil.

### 2.4.1 Energie de capture

Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, le traitement du signal, la conversion analogique/numérique et l'activation de la sonde du capteur. En règle générale, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale [49]. Deux solutions peuvent être mise en œuvre pour minimiser la consommation d'énergie due à la capture, notamment, la réduction des données de capteur en supprimant les captures inutiles, ou bien l'utilisation des composants à faible consommation d'énergie, mais qui réduisent ainsi leurs performances.

### 2.4.2 Energie de traitement

Le traitement inclut l'exécution des protocoles de communication et les algorithmes de traitement de signaux sur les données collectées. Ce traitement est effectué par les microprocesseurs. En générale, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [50].

Il existe deux approches pour conserver la consommation d'énergie lors de l'opération de traitement :

- L'approche de partitionnement du système : consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul. [47].
- L'approche DVS (*Dynamique Voltage Scaling*) : consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour réduire la puissance de calcul sans dégradation des performances [51].

### 2.4.3 Energie de communication

L'énergie de communication représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud [52]. Cette communication est assurée dans la plupart des RCSFs par le support de transmission radio. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par plusieurs facteurs : le type du système de modulation, la quantité des données à communiquer, la puissance de transmission (déterminée par la distance de transmission) [53]. Le module radio est le composant d'un nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les éléments du réseau. En général, le module radio fonctionne dans quatre modes d'opération différents : transmission (la radio

transmet un paquet), réception (la radio reçoit un paquet), actif "idle" (la radio est sous tension, mais elle n'est pas employée) et sommeil (la radio est mise hors tension). La radio consomme beaucoup plus d'énergie dans les modes transmission et réception. Cependant, le mode actif est également coûteux en énergie. Dans la plupart des cas, la consommation d'énergie est relativement élevée dans le mode actif, puisque ce dernier nécessite que le module radio soit mis sous tension et décode continuellement les signaux radios pour détecter l'arrivée des paquets. Les principales causes de réduction de la durée de vie lors de la phase de communication se situent sur deux niveaux : local et global.

### 2.4.3.1 Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie de communication

#### 1. Au niveau local : MAC

Les principales sources de perte d'énergie sur le front local sont essentiellement celles causées par les imperfections des protocoles MAC à faire face aux problèmes suivants [54] :

**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 essayent à leur manière d'éviter les collisions. Les collisions concernent plutôt les protocoles MAC avec contention [47].

**L'écoute à vide "idle listening" :** Pour éliminer ou réduire les collisions, les nœuds doivent percevoir (écouter) continuellement le canal pour recevoir des informations sur le plan d'accès au canal ou attendre jusqu'à ce que le canal soit disponible pour l'envoi des données. Dans les deux cas, le module radio est actif avec une consommation d'énergie non négligeable par rapport à celles requises pour l'émission et la réception [3].

**La surécoute "overhearing" :** En partageant un médium sans fil commun, les données transmises par un nœud capteur peuvent atteindre d'autres nœuds dans sa portée de transmission. Un nœud peut alors recevoir des paquets qui ne lui sont pas destinés (figure 2.6). Ce phénomène qui porte le nom de surécoute, conduit à une perte d'énergie additionnelle [55].

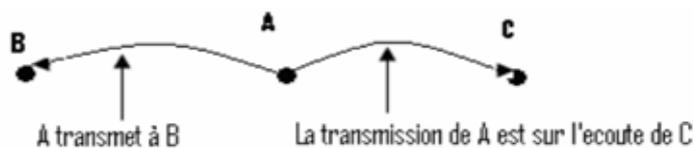


FIGURE 2.6 – La surécoute dans une transmission.

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

**La surémission "overemitting" :** Un capteur envoie des données et le capteur destinataire n'est pas prêt pour les recevoir.

**La taille des paquets :** La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquiescement) généré augmente l'overhead. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille [55].

## 2. Au niveau global : Routage

D'un point de vue global, un mauvais acheminement des paquets de données a un impact sur la durée de vie du réseau. Cette réduction est due aux anomalies des protocoles de routage à savoir le choix des routes et le surcoût des protocoles [3].

### 2.4.3.2 Techniques de minimisation de la consommation d'énergie

#### 1. Au niveau MAC

**Mode d'économie d'énergie :** la plupart des solutions proposées à ce niveau définissent un mode veille durant lequel un nœud limite son activité afin de conserver son énergie [56]. En effet, le moyen le plus efficace pour minimiser la consommation d'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (*low-power*), à chaque fois que la communication n'est pas utile, i.e. il n'y a plus de données à envoyer ou à recevoir, elle devrait être prête à recevoir dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu.

**Limitation des accusés de réception :** l'utilisation des acquittements est mal adapté à des réseaux denses, car il provoque une surcharge du réseau et par conséquent des collisions et des interférences avec les données utiles échangées dans le réseau [57].

**Organisation des échanges :** ce procédé revient à limiter les problèmes de retransmission dus aux collisions. La solution extrême consiste à utiliser la technique d'accès au médium TDMA (*Time Division Multiple Access*) [57]. Les collisions sont ainsi fortement réduites. Cette solution présente l'inconvénient d'être peu flexible et de demander une synchronisation fine des capteurs.

## 2. Au niveau routage

**Le choix des routes :** Pour minimiser la consommation d'énergie d'un WSN au niveau routage, il faut veiller à choisir le meilleur chemin en se basant sur les contraintes d'énergie comme facteur de stabilité du chemin. Ceci se traduit par le fait de choisir le chemin garantissant la consommation d'énergie la plus faible ou encore de choisir le chemin passant par les nœuds intermédiaires ayant les batteries les plus chargées.

Divers protocoles ont été implémentés pour la conservation de l'énergie au niveau routage :

- **Minimum Total Transmission Power Routing :** Cette technique vise à choisir la route qui minimise la consommation d'énergie en considérant que le meilleur chemin est celui assurant la consommation minimale des capacités des batteries. L'inconvénient de cette technique est que la durée de vie d'un nœud donné ne se reflète pas directement et les nœuds qui se réveillent régulièrement et redécouvrent leurs voisins ne sont pas pris en charge [38]
- **Minimum Battery Cost Routing :** Considère que la capacité restante des batteries reflète mieux la durée de vie d'un nœud et choisit la route qui maximise la capacité résiduelle de la batterie. L'avantage de ce protocole est de protéger les nœuds contre l'épuisement et assure le choix du meilleur chemin. Par contre, un chemin contenant un nœud avec une capacité faible peut être choisit [39].
- **Min-Max Battery Cost Routing :** L'Algorithme consiste à choisir le nœud ayant la batterie la plus chargée sur chaque route. Ensuite la route choisie est celle qui comporte le nœud de plus grande quantité d'énergie parmi ceux choisis. Ce protocole a pour avantage d'équilibrer l'utilisation des batteries des nœuds. Mais, en contre partie, il ne garantit pas que le chemin choisi soit le chemin

ayant la plus faible consommation d'énergie [39].

**Réduction du coût de fonctionnement :** En plus de la complexité de calcul, le surcoût des protocoles concerne aussi le nombre de messages échangés. En effet, les protocoles de routage échangent des messages de contrôle pour établir des routes. Ces messages de routage présentent un coût supplémentaire. Donc le protocole de routage doit réduire autant que possible leur utilisation [3]. Parmi les techniques utilisées pour réduire le nombre de messages échangés nous citons la technique d'agrégation de messages et la retransmission sélective :

- **Agrégation de messages :** qui consiste à agréger les messages identiques par des nœuds intermédiaires afin de ne retransmettre qu'un seul, et d'éviter la redondance. En effet, [58] chaque capteur peut générer un flot de données (le contenu dépend du capteur) et envoyer le tout aux autres capteurs présents dans sa région de communication. A ce stade, on peut soulever un problème majeur : deux capteurs (ou plus) physiquement proches vont probablement générer des données identiques, il y a donc une redondance d'où une perte inutile d'énergie en ce qui concerne le traitement et la transmission. La notion d'agrégation permet de combiner des données en provenance de différentes sources via plusieurs opérations possibles, de la simple suppression aux calculs de moyenne ou de minimums/maximums en fonction du type d'information.
- **Retransmission sélective de messages :** cette technique est souvent utilisée pour réduire le nombre de messages envoyés alors qu'ils ne sont pas nécessaires pour le fonctionnement correct du protocole. Par exemple, l'inondation aveugle pour envoyer un message à tous les nœuds d'un réseau génère des messages redondants. En effet, dans l'inondation aveugle chaque nœud qui reçoit un nouveau message le rediffuse localement à ses voisins. Comme chacun des voisins rediffuse lui aussi à ses voisins, chaque nœud recevra plusieurs copies du même message. Pour réduire le nombre de messages redondants plusieurs méthodes de diffusion optimisée ont été élaborées. Elles se basent sur l'estimation par chaque nœud de la redondance de sa retransmission et sur la précision de cette estimation.

Parmi les diffusions optimisées, il y a celles qui sont basées sur des heuristiques et qui donc n'assurent pas que le message atteint tous les nœuds du réseau, et les autres basées sur des solutions exactes et qui assurent donc une couverture totale du réseau. Notons que l'implémentation des solutions heuristiques est beaucoup plus simple que les autres [10].

Parmi les diffusions heuristiques, il y a la diffusion probabiliste [2][60], la diffusion à base de compteur [60], de distance [60], etc.

Il existe également plusieurs diffusions exactes [59], parmi celles-ci, il y a la diffusion basée sur la localisation géographique [61].

L'objectif de ces deux techniques est certes de minimiser les pertes énergétiques mais également d'exploiter au mieux la bande passante. Puisque les échanges inutiles sont supprimés ou minimisés. Il s'agit donc des opérations critiques pour l'optimisation de la durée de vie du réseau.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur la présentation de différents mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie et sur des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Ainsi, cette étude nous a permis de faire une étude critique des techniques et protocoles de routage existant, ce qui nous a fourni des connaissances et nous a induit ainsi, à améliorer un protocole de routage pour minimiser la consommation de l'énergie du RCSF.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre approche de routage et le principe adopté pour le proposer. Ensuite, nous allons citer les techniques d'évaluation du système qui nous permettra de calculer et d'évaluer notre propre protocole.

# Chapitre 3

## N2E-WSNs : New Energy-Efficient routing protocol for Wireless Sensor Networks

### 3.1 Introduction

L'autonomie en énergie des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil est critique. La consommation de l'énergie doit être minimisée pour maximiser la durée de vie du réseau et/ou du capteur.

Les batteries des capteurs sont de petite capacité, et pour des raisons de coûts de maintenance, il est préférable de ne pas remplacer ces batteries. De ce fait, le réseau doit accomplir sa mission tout en conservant l'énergie des nœuds. Cette dernière est consommée dans trois fonctions : la capture, le calcul (traitement), la communication. Plusieurs facteurs interviennent dans ces fonctions : l'état du module radio, le type d'application, le protocole de routage, la politique d'accès au canal de transmission, ...etc. Pour maîtriser l'effet de ces facteurs sur la consommation énergétique, la communauté des chercheurs a proposé un très grand nombre de techniques de conservation d'énergie.

Dans ce chapitre, nous présentons le protocole de routage à plat SGDF, en décrivant les étapes de son fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients. Ensuite, nous introduisons notre approche N2E-WSNS qui consiste à améliorer ce protocole.

## 3.2 Motivation

En raison des limites présentées par les capteurs, la conservation d'énergie afin de maximiser la durée de vie, est l'une des problématiques les plus fondamentales dans les réseaux de capteurs sans fil. Le routage est considéré parmi les fonctionnalités principales d'un réseau de capteurs, il consiste à faire parvenir les données capturées aux stations de base, en empruntant les chemins induisant des dépenses énergétiques minimales.

Pour résoudre ce problème, nous proposons une technique de routage linéaire qui est une version améliorée de SGDF, prenant en compte l'énergie restante du système. Nous supposons qu'un capteur récepteur d'information détient la liste de ses voisins ainsi que leur nombre de saut par rapport au sink, les voisins d'un capteur sont ceux qui se situent à portée de communication de celui-ci. L'algorithme de routage que nous proposons, choisit une fonction objectif en utilisant deux facteurs essentiels : l'énergie résiduelle de chaque capteur et la distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur.

## 3.3 Etude critique du protocole SGDF

### 3.3.1 Fonctionnement du protocole SGDF

Le protocole SGDF [27] a été conçu pour résoudre les problèmes de Flooding [63] et Floosiping [64]. Le protocole SGDF est constitué de deux étapes :

#### **Première étape (Initialisation de la topologie du réseau) :**

Après avoir déployé les capteurs aléatoirement, le SGDF commence l'initialisation du réseau : Premièrement, le sink broadcast un message "Hello" pour ses voisins. Ce message contient trois champs : l'adresse du sink, le nombre de sauts et le seuil (nombre entre 0 et 1 pour décider dans l'étape de routage s'il utilise le mode Flooding). Dans le message "Hello" l'adresse de sink est fixe contrairement au nombre de sauts (initialisé à 1).

Les capteurs voisins recevant ce message, sauvegardent l'adresse du sink et le nombre de sauts. Si un capteur n'a pas déjà reçu le message, il garde le nombre de sauts comme gradient en l'incrémentant de 1. Ce capteur va créer un nouveau message qui sera envoyé en broadcast à tous ses voisins après avoir fait la mise à jour du nombre de sauts. Si le gradient existe déjà quand un capteur reçoit

un message "Hello", il compare le nombre de sauts du message avec le sien et sauvegarde le plus petit.

A la fin de cette étape, chaque capteur aura un gradient qui détermine le nombre de sauts pour atteindre le sink.

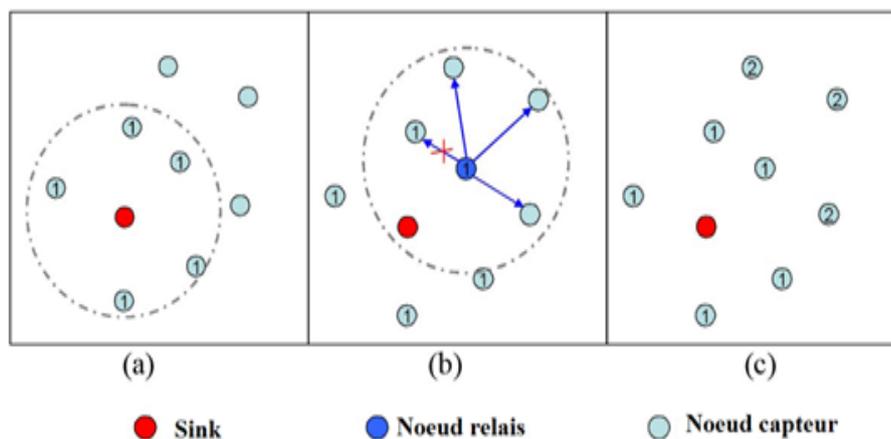


FIGURE 3.1 – Initialisation du réseau.

**Deuxième étape (Le routage) :** Après la première étape d'initialisation du réseau, vient l'étape de routage du SGDF. Il utilise GOSSIPING Simple et FLOOSIPING pour router les informations. Le nœud génère un paquet à la détection d'un événement à envoyer au sink. L'en-tête du paquet comporte 8 champs (l'adresse de la source, l'adresse du sink, l'adresse du nœud courant, l'adresse du nœud prochain, le numéro de séquence généré par la source, le temps à vivre du paquet, le mode de routage et le nombre de sauts du nœud courant).

La source diffuse un message de demande à ses voisins demandant leur adresse et leur gradient quand il y a un paquet à transmettre. À la réception des réponses, la source sélectionne aléatoirement un de ses voisins parmi ceux dont le gradient est inférieur au sien. Dans le cas où, la source n'a pas de voisins dont le gradient est inférieur au sien, là elle choisie un parmi ceux qui ont le même gradient qu'elle.

Ainsi, si un voisin est choisi, il est utilisé pour être le prochain saut pour recevoir le paquet, alors que les autres, en écoutant de la source génèrent un nombre aléatoire. Si le nombre généré est inférieur au seuil TH passé aux nœuds dans la première phase, les voisins associés auront le paquet et démarreront le routage en

mode Floosiping. Plus précisément, les informations de l'en-tête vont être modifiées, tel que, le champ TH va être mis à 0 (ce qui indique une transmission en mode Floosiping) et le champ TTL est fixé à 10 pour limiter le nombre de message dans le mode Floosiping, comme il a été défini dans [62]. Une fois les champs bien définis, le paquet est diffusé. Tous les voisins, recevant ce paquet, comparent le champ de nombre de sauts du paquet avec leur propre gradient. Si ce dernier est supérieur à celui du paquet et si les nœuds n'ont pas reçu le paquet avant, ils soustraient le champ TTL de 1 et diffuse le paquet.

Le mode de routage Floosiping est répété jusqu'à ce que le sink reçoive le paquet ou bien que le champ TTL du paquet est réduit à 0.

La figure 3.2 illustre un exemple de fonctionnement du protocole SGDF :

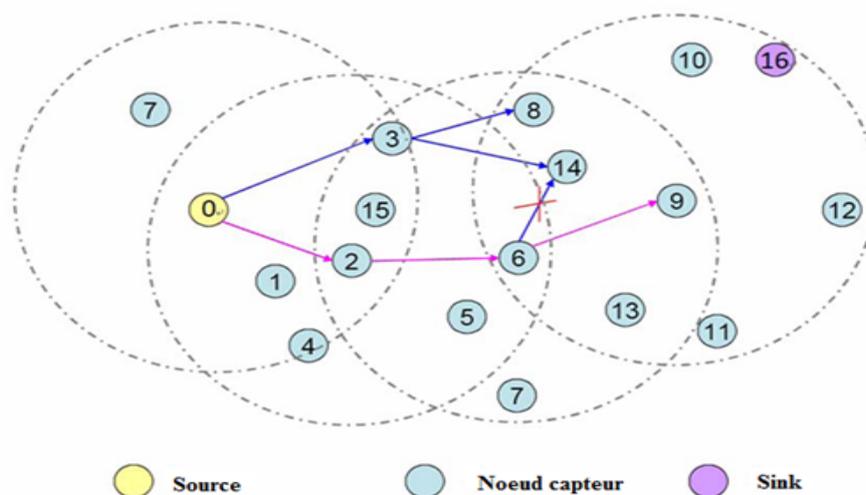


FIGURE 3.2 – Exemple du fonctionnement du protocole SGDF.

La figure 3.2 montre comment le paquet est délivré dans SGDF. Au début, la source (0) sélectionne le nœud (2) pour être le prochain dans Gossiping simple puis diffuse le paquet. Le nœud (2) reçoit le paquet et les autres voisins du nœud (0) dont le gradient est plus petit que celui de la source vont générer un nombre aléatoire entre  $[0, 1]$ . On suppose que le nœud (3) a généré un nombre aléatoire plus petit que le seuil passé dans la première phase. Ensuite, il activera le plan de routage de Flooding directionnel. Le nœud (2) répète les étapes précédentes. En même temps, le nœud (3) diffuse le paquet en mode Flooding directionnel. Le gradient des nœuds (8) et (14) est plus petit que celui du nœud (3). Donc, ils vont

recevoir le paquet inondé puis le retransmettre. Ensuite, le nœud(2) sélectionne le nœud(6) pour être le prochain saut, nous supposons que le nœud (6) sélectionne le nœud(9) pour être le prochain. En même temps, le nœud (14) a la possibilité de recevoir le paquet du nœud (6), mais le nœud (14) a déjà reçu le paquet venu du nœud (3) qui implique que le nœud (14) va exclure celui du nœud (6). Ceci règle le problème d'implosion. En répétant les étapes, le paquet est délivré au sink (16).

### 3.3.2 Critiques

Le choix aléatoire des nœuds et l'inondation directionnelle peuvent poser un échec dans certaines transmissions, notamment quand le nœud choisi aléatoirement a épuisé ce qui lui reste d'énergie à la réception du paquet et en même temps, que les autres nœuds en écoute génèrent un nombre aléatoire supérieur à celui passé à la première phase ou bien que le champ TTL est égale à 0.

En outre, le fait de router les paquets sur plusieurs chemins induit la réduction de la durée de vie du réseau.

## 3.4 Une nouvelle approche de routage

Dans ce qui suit, nous proposons N2E-WSNs , une amélioration du protocole de routage à plat SGDF. Le but est d'augmenter la durée de fonctionnement du réseau. L'idée de notre protocole consiste à choisir un capteur, auquel l'information sera transmise, en se basant sur un certain nombre de critères de ses voisins (énergie résiduelle, distance entre l'émetteur et le récepteur et nombre de sauts), contrairement au protocole SGDF qui fait ce choix de façon aléatoire et en générant un nombre aléatoire. La caractéristique principale de notre protocole, est la création dynamique d'une nouvelle route entre chaque nœud capteur d'une information et la station de base.

## 3.5 Hypothèses et principe de fonctionnement

### 3.5.1 Hypothèses

Afin de développer notre protocole, dans le but d'étendre la durée de vie du réseau nous mettons en place dans ce qui suit, les hypothèses sur lesquelles se base notre

travail :

- Les capteurs sont déployés aléatoirement sur la zone à surveiller. Une fois déployés, les capteurs sont statiques.
- Le réseau de capteurs est complètement connecté.
- L'énergie consommée durant le traitement des données est négligeable.
- Le sink est doté d'une énergie théoriquement inépuisable.
- La portée est constante pour tous les capteurs.
- Les évènements détectés suivent une loi de poisson, ils sont récupérés à partir d'un échéancier.

### 3.5.2 Description du protocole N2E-WSNs

Dans notre approche, nous gardons les mêmes étapes de la première phase d'initialisation de la topologie du réseau du protocole SGDF mais nous apportons des modifications dans le paquet transmis. Notre paquet va comporter deux champs ; le premier contenant l'adresse du sink et le deuxième le nombre de sauts.

En ce qui concerne phase de routage, notre approche se base sur trois critères concernant les voisins de l'initiateur de communication :

- L'énergie résiduelle des voisins (ER),
- La distance (D) du voisin à choisir par rapport à l'initiateur de communication.

Etant donné un nœud initiateur voulant émettre un message à ses voisins (voisins dont le nombre de sauts est inférieur au sien), nous allons leur affecter une probabilité dans le but d'être choisit comme prochain nœud à recevoir le paquet. Cette probabilité est représentée par une fonction objectif 'f', ayant comme paramètres les deux critères ER et D, donnée comme suit :

$$f(ER, D)$$

Afin de maximiser la fonction objectif, il faut maximiser l'énergie résiduelle ER et minimiser la distance D, ceci en maximisant son inverse 1/D.

La probabilité de transmission d'un paquet du capteur i vers le capteur j (l'un des voisins de i dont le nombre de sauts est inférieur à celui de la source) est donnée comme suit :

$$f_{ij} = \frac{ER_j \times \frac{1}{D_{ij}}}{\sum_{k=1}^N ER_k \times \frac{1}{D_{ik}}}$$

Où

$ER_j$  : Énergie résiduelle du capteur j (voisin de i).

$D_{ij}$  : Distance entre le capteur émetteur et le voisin j (en mètre).

$N$  : Nombre de voisins du capteur i (les voisins ayant le nombre de sauts inférieur à celui de l'initiateur).

Afin de bien illustrer le fonctionnement de notre approche (les deux étapes), une représentation sous forme d'organigrammes est présentée dans les figures ci-dessous :

**Organigramme de la première étape (Initialisation du réseau) :**

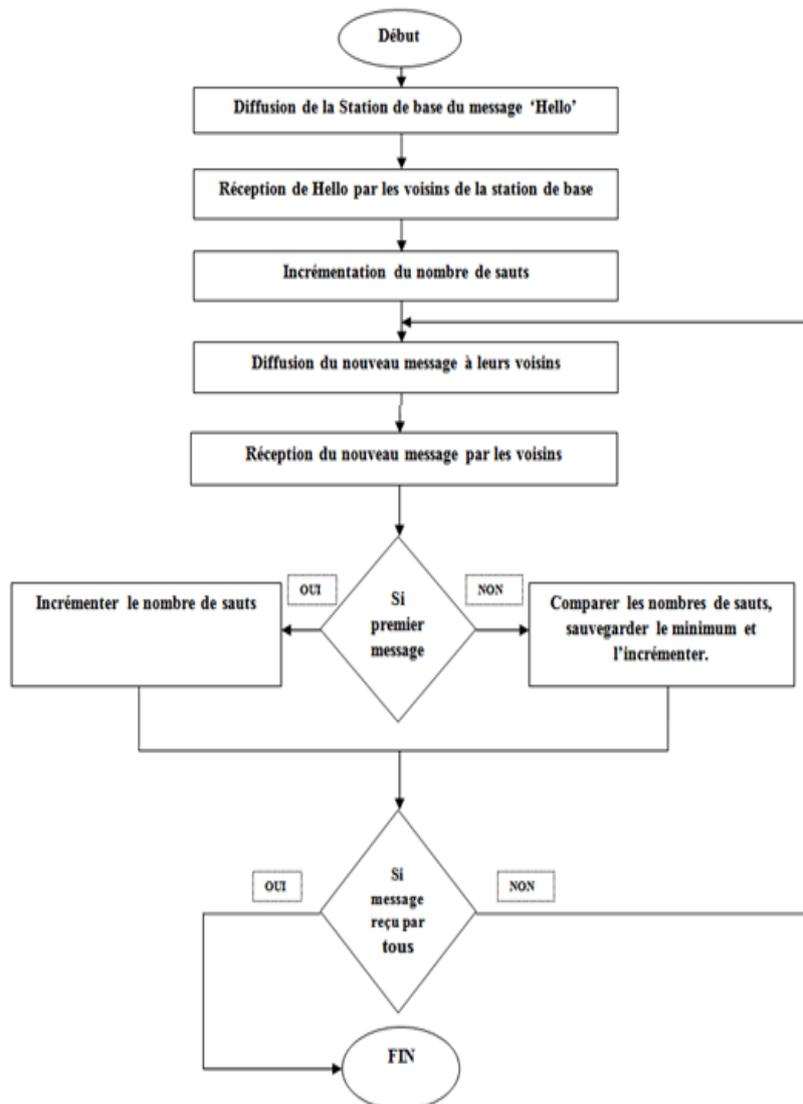


FIGURE 3.3 – Organigramme de la première étape de notre approche.

Organigramme de la deuxième étape (Routage) :

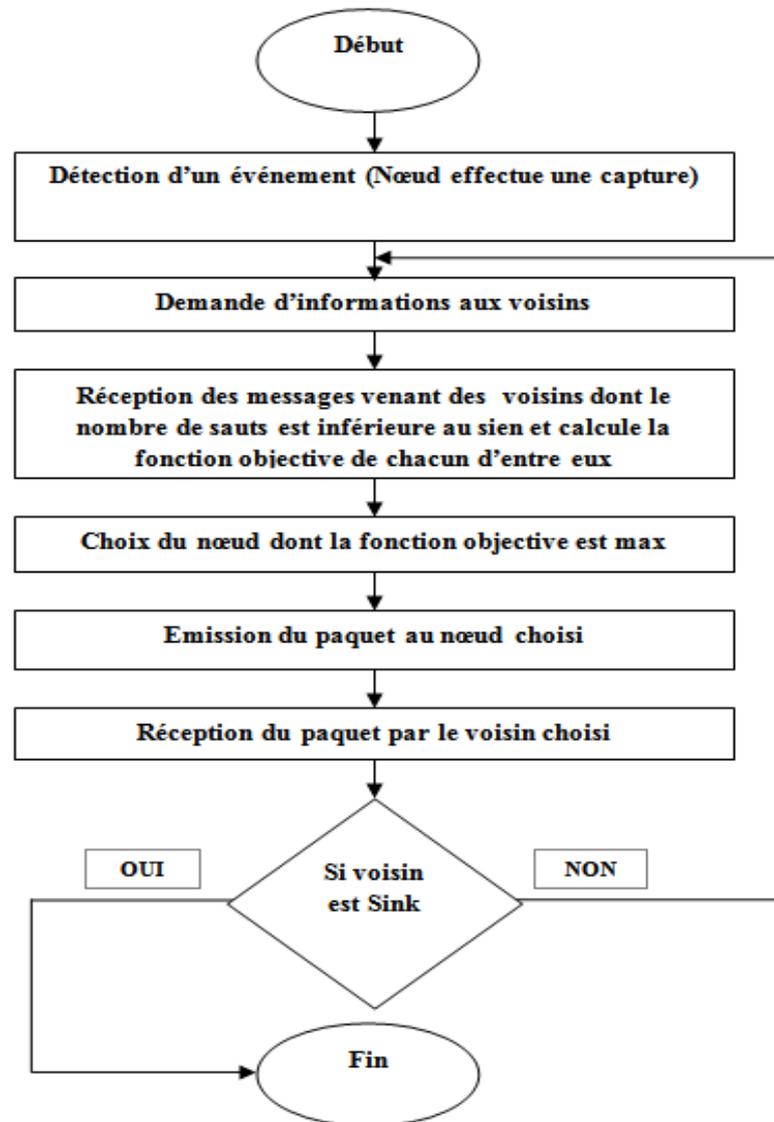


FIGURE 3.4 – L'organigramme de la deuxième étape de notre approche.

Les paquets de données sont transmis à la station de base à travers un chemin établi dynamiquement. A l'instant où un capteur détecte un événement, il sélectionne l'un de ses voisins dont la probabilité est supérieure aux autres. La sélection du voisin est basée sur le maximum de la fonction objective décrite antérieurement (Section 5.2).

Une fois le paquet reçu par le voisin choisi, il vérifie si l'un de ses voisins est la station de base. Si c'est le cas, il émet directement le paquet à la station de base, si non, il refait le même parcours que précédemment. Ainsi, le processus est répété jusqu'à ce que le paquet atteigne la station de base.

### 3.5.3 Exemple appliqué au protocole N2E-WSNs

Soit un réseau de capteurs déployé afin de détecter les événements qui peuvent survenir dans la zone surveillée. Dans ce cas, les nœuds représentent l'ensemble des capteurs et les communications, entre les capteurs sont possibles si l'un est à l'intérieur de la zone de l'autre. On dit alors que les capteurs sont voisins.

L'objectif est de router l'information vers la station de base, en empruntant le chemin minimisant la consommation d'énergie. Le réseau est illustré dans la figure suivante.

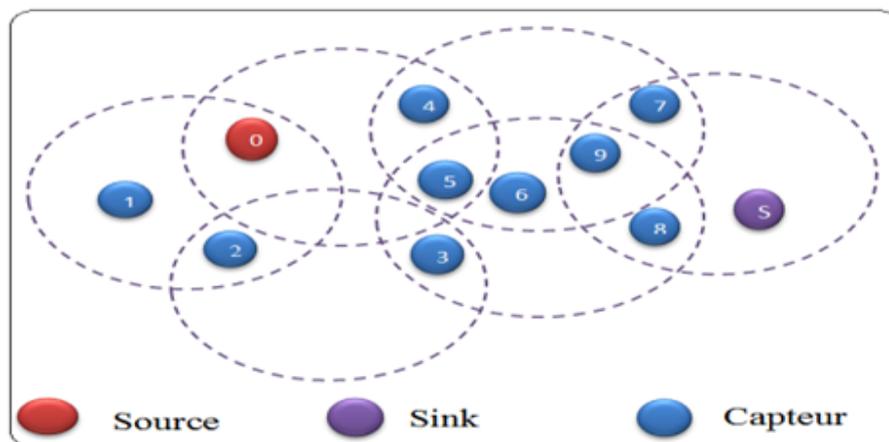


FIGURE 3.5 – Exemple d'application du protocole N2E-WSNs.

Les énergies résiduelles  $ER$  (unité en joule) et le nombre de sauts par rapport à la station de base ( $NS$ ) :

- $ER(0) = 1.2$  —  $NS(0, SINK) = 3$
- $ER(1) = 0.9$  —  $NS(1, SINK) = 4$
- $ER(2) = 1.4$  —  $NS(2, SINK) = 3$
- $ER(3) = 0.8$  —  $NS(3, SINK) = 2$

- ER (4) = 1.0 — NS (4,SINK) = 2
- ER (5) = 0.7 — NS (5,SINK) = 2
- ER (6) = 1.2 — NS (6,SINK) = 2
- ER (7) = 0.9 — NS (4,SINK) = 1
- ER (8) = 1.1 — NS (5,SINK) = 1
- ER (9) = 1.3 — NS (6,SINK) = 1

Le nœud (0) capture un évènement, donc c'est lui l'initiateur de communication.

#### Itération 1 :

Les voisins du nœud 0 sont : 1,2,4,5.

Le nœud 0 envoie à ses voisins un message demandant leur énergie résiduelle. Seuls ceux qui ont le nombre de sauts inférieur au sien vont répondre à ce message, en lui communiquant leur énergie résiduelle.

Dans ce cas, seuls les nœuds 4 et 5 vont lui communiquer leur énergie (Energie calculée en utilisant le modèle énergétique cité dans la section du chapitre suivant).

ER(4)= 1.0, ER(5)= 0.7.

Une fois cette énergie reçue, le nœud 0 calcule la distance le séparant de chacun des nœuds 4 et 5 et ceci grâce à la puissance du signal [60].

D (0, 4)= 2, D(0,5)= 1.5.

Calcule des fonctions objectives des nœuds 4 et 5 :

$$f_{04} = \frac{1.0 \times \frac{1}{2}}{(1.0 \times \frac{1}{2}) + (0.7 \times \frac{1}{1.5})} = 0.52$$

$$f_{05} = \frac{0.7 \times \frac{1}{1.5}}{(1.0 \times \frac{1}{2}) + (0.7 \times \frac{1}{1.5})} = 0.48$$

Le maximum de ces fonctions est celui du nœud 4, donc il est choisi pour recevoir le paquet.

#### Itération 2 :

Les voisins du nœud 4 sont : 0,5,6,7,9.

Ceux dont le nombre de sauts est inférieur à celui du nœud 4 sont les nœuds 7 et 9.

ER(7)= 0.9, ER(9)= 1.3.

D(4,7)= 2,5, D(4,9)= 3.

$$f_{47} = \frac{0.9 \times \frac{1}{2.5}}{(0.9 \times \frac{1}{2.5}) + (1.3 \times \frac{1}{3})} = 0.45$$

$$f_{49} = \frac{1.3 \times \frac{1}{3}}{(0.9 \times \frac{1}{2.5}) + (1.3 \times \frac{1}{3})} = 0.54$$

Le maximum de ces fonctions est celui du nœud 9, donc il est choisi pour recevoir le paquet.

### Itération 3

Les voisins du nœud 9 sont : 7, 8, sink.

Son voisin direct est la station de base, la condition d'arrêt de l'algorithme est atteinte.

Donc Transmission du paquet au SINK.

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le protocole de base SGDF en expliquant son fonctionnement et en soulevant les inconvénients qu'il présente, ce qui nous a permis de proposer une amélioration au protocole SGDF.

L'approche proposée N2E-WNSNs, permet de réduire la consommation énergétique lors du routage des paquets de la source jusqu'à la station de base. Ce qui permet d'augmenter la durée de vie du réseau ou du capteur.

Dans le chapitre suivant, nous démontrons par des simulations les apports énergétiques apportés dans l'amélioration proposée comparé à celle de base.

# Chapitre 4

## Simulation et Analyse de performances

### 4.1 Introduction

La simulation est d'abord une activité courante dans tous les domaines de l'activité humaine. C'est un outil d'aide à la décision dont le but principal est d'étudier les performances d'un système complexe, un système informatique matériel ou logiciel. Elle est basée sur la modélisation qui permet de décider (à l'aide d'un langage) au mieux le fonctionnement réel du système.

Afin d'évaluer les performances du protocole proposé, dans la première partie de ce chapitre, nous présentons les étapes principales de réalisation de notre programme de simulation. Puis, dans la seconde, nous illustrons à travers une comparaison que le protocole N2E-WSNs est meilleur que SGDF, en terme de consommation d'énergie moyenne.

### 4.2 Modèle de simulation

Un modèle est la représentation du fonctionnement d'un système s'appuyant sur des outils mathématiques ou autres permettant d'approcher le comportement du système. Suivant les objectifs souhaités, les modèles tendent à concentrer les comportements et les paramètres permettant de cerner au mieux le fonctionnement à étudier. La modélisation est la substitution d'un système par un modèle que l'on pourra résoudre

[64].

Notre système est basé sur l'approche événementielle. Dans ce qui suit, nous détaillerons le modèle de simulation du système, ainsi que le modèle d'énergie.

### 4.2.1 Description du système

Notre système représente une zone de capture d'une surface de  $(100 \times 100) \text{m}^2$  comportant 300 capteurs et une station de base. Ces capteurs sont déployés aléatoirement sur la zone afin de collecter les informations et de les faire acheminer vers la station de base par l'intermédiaire des autres capteurs.

De ce fait, notre système est constitué de :

- **La station de base** : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau.
- **Les Nœuds capteurs** : ils servent à détecter les événements et participent au routage des informations dans le réseau. Le modèle réseau utilisé consiste en un ensemble de capteurs sans fil, immobiles, aléatoirement dispersés sur le terrain simulé et présentant les mêmes caractéristiques en mémoire et en puissance de traitement et dont l'énergie initiale de chacun d'entre eux est fixée à 1 joules.

### 4.2.2 Modèle d'énergie

Le modèle radio proposé par Heinzelman et al[29] a été utilisé pour calculer l'énergie consommée pendant l'émission et la réception des messages. Selon ce modèle l'énergie consommée pendant l'émission  $E_e$  d'un message de  $pk$  bits sur une distance de  $d$  mètres, est donnée par la formule suivante :

$$E_e = E_{elec} \times pk + E_{amp} \times pk \times d^2$$

- L'énergie consommée pendant la réception  $E_r$  d'un message de  $pk$  bits est donnée par :

$$E_r = E_{elec} \times pk$$

Où

- $E_e$  : L'énergie consommée en émission.

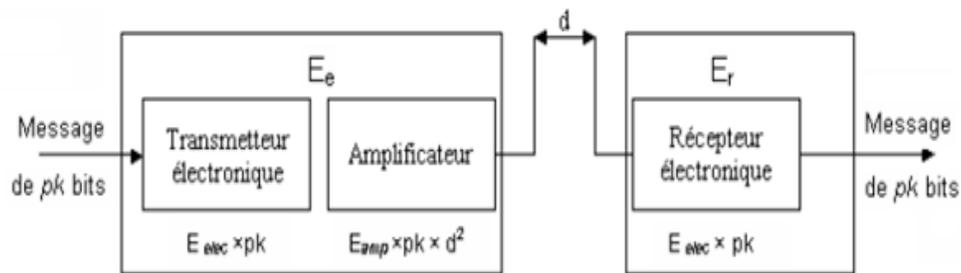


FIGURE 4.1 – Modèle d'énergie

- $E_r$  : L'énergie consommée en réception.
- $E_{amp}$  : L'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur) dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.
- $E_{elec}$  : L'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique) dont la valeur est fixée à 100 pJ/bit.
- $Pk$  : La taille en bit d'un paquet de données.
- $D$  : La distance en mètre entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.

### 4.2.3 Métriques de performances

Un grand nombre de métriques de performances peut être défini pour évaluer les réseaux de capteurs sans fil, afin de comprendre leurs comportements et caractéristiques critiques. Mais, pour évaluer les performances de notre protocole, nous nous sommes intéressés aux métriques suivantes :

- **L'énergie résiduelle du réseau** : C'est la quantité d'énergie restante dans le réseau après l'invocation du protocole de routage pour un événement donné.
- **La durée de vie du réseau** : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où le premier nœud épuise toute son énergie.
- **Le temps de réponse moyen** : Il est défini de l'instant où l'événement se produit jusqu'à ce qu'il soit transmis avec succès à la station de base.
- **L'efficacité énergétique** : Cette métrique est considérée comme étant la quantité

d'énergie consommée par rapport au taux de données envoyées dans le réseau, sa fonction est donnée comme suit [65] :

$$S = \frac{TS}{1 - \frac{ME}{E_0}}$$

Où :

- ME : Dénote l'énergie résiduelle minimale depuis l'énergie initiale ( $E_0$ ) de tous les nœuds dans le réseau à la fin de simulation.
- TS (Taux de succès) : Le taux de livraison de paquets ou bien le nombre de paquets de données qui est réceptionné par la station de base avec succès.

Mais, pour évaluer les performances de notre protocole, nous nous sommes intéressés métriques de l'énergie résiduelle.

#### 4.2.4 Variables descriptives du système

Les différentes variables utilisées dans notre système sont illustrées dans le tableau suivant :

Définition de la variable	Nom de la variable	Valeur initiale	Type	Unité de mesure
Energie initiale de la batterie de station de base.	$E_{sb}$	illimitée	Réel	Joule
Position de la station de base	$(x, y)$	$(0, 0)$	Entier	Mètre
Energie consommée lors de l'émission d'un message	$E_e$		Réel	Joule
Energie consommée à la réception d'un message	$E_r$		Réel	Joule
Energie résiduelle (ou courante) d'un capteur	$E_c$		Réel	Joule
Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D	$(x, y)$		(Réel, Réel)	(Mètre, Mètre)
Distance entre deux capteurs	$d$		Réel	Mètre
Nombre de capteurs	$N_C$	300	Entier	/
Portée des capteurs	Porte	20	Entier	Mètre
Taille d'un message	PK	256	Entier	Bit

**Tab.4.1:** Les paramètres de simulation

- *Energie résiduelle* : elle est exprimée par la différence entre l'énergie courante et l'énergie consommée par un capteur. L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation suivante :

$$E_c = E_c - E_x$$

$$\begin{cases} E_x = E_e & \text{si le capteur envoie un message.} \\ E_x = E_r & \text{si le capteur reçoit un message.} \end{cases}$$

- *Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D* : c'est l'affectation de deux valeurs aléatoires (x et y), comprises entre 0 et la taille du terrain, à chaque capteur sur un plan à deux dimensions.
- *Distance entre deux capteurs* : c'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées

$(x, y)$  et un autre de coordonnées  $(x', y')$  :

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

### 4.2.5 Evènements discrets du système

L'ensemble des évènements, qui peuvent survenir dans le temps et qui provoquent un changement d'état des variables descriptives de notre modèle de simulation, sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Evènement	Description
Calcul de la fonction objective	Cet évènement se produit lorsqu'un nœud capture une information.
Le choix du prochain saut.	Cet évènement s'effectue lorsqu'un nœud veut choisir le voisin auquel il transmet le paquet. Se fait selon le max de la fonction objective
Mis à jour des énergies	Cet évènement s'effectue lorsqu'un nœud reçoit ou émet un paquet de données.

**Tab.4.2:** Evènements discrets du système

### 4.2.6 Choix du langage de programmation

MATLAB est à la fois un langage de programmation et un environnement de développement développé et commercialisé par la société Américaine The Math Works. MATLAB est utilisé dans les domaines de l'éducation, de la recherche et de l'industrie. Il est connu par sa simplicité et son efficacité de calcul. Il est doté par une interface graphique puissante [65].

MATLAB est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

### 4.2.7 Etapes de réalisation du programme de simulation

Pour implémenter notre simulateur nous avons suivi les étapes décrites dans la figure ci-dessous :

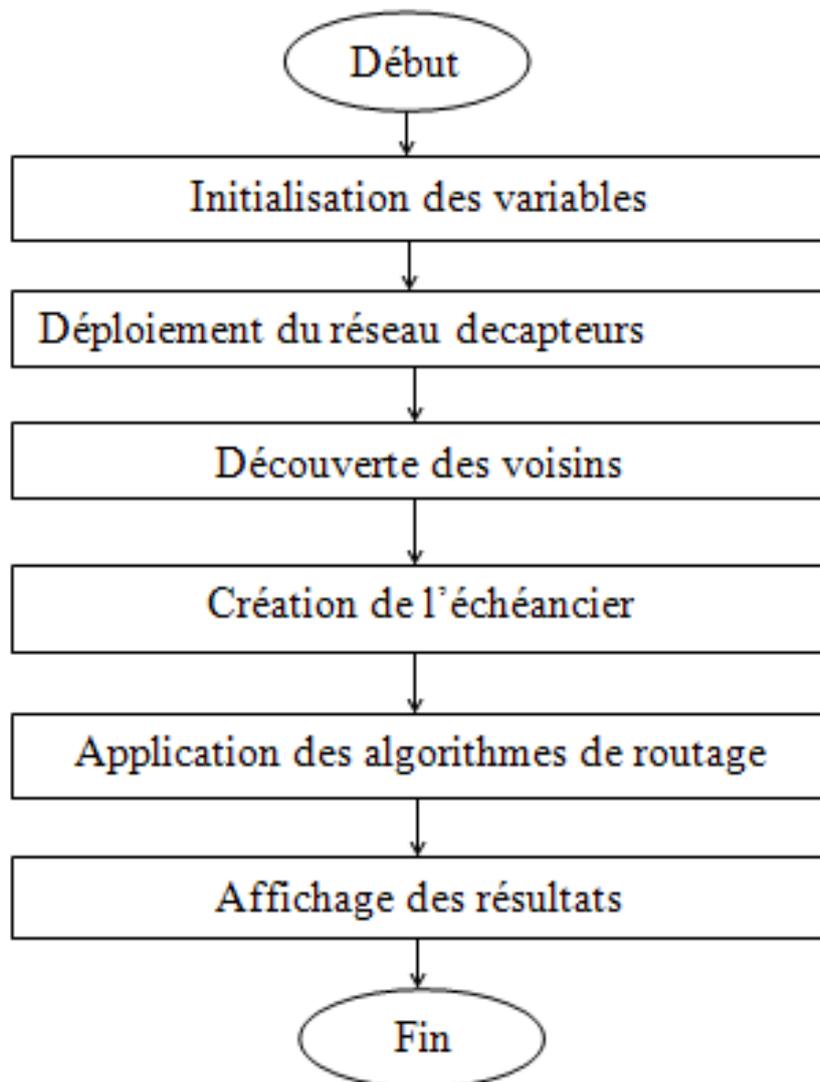


FIGURE 4.2 – Fonctionnement du programme de simulation.

- **Initialisation de variables** : Cette étape consiste à créer les capteurs et les déployer. Elle inclut les variables globales de notre système (nombre de capteurs, surface du terrain simulé, nombre de tests et d'exécution à réaliser, ect).
- **Déploiement du réseau** : Les capteurs constituant notre réseau sont déployés

d'une manière aléatoire sur une surface de  $(100 * 100)$  m<sup>2</sup>. Chaque capteur dans le réseau est représenté par ses coordonnées  $(x, y)$ . par défaut, la station de base prend les coordonnées  $(0, 0)$  afin de simplifier les calculs.

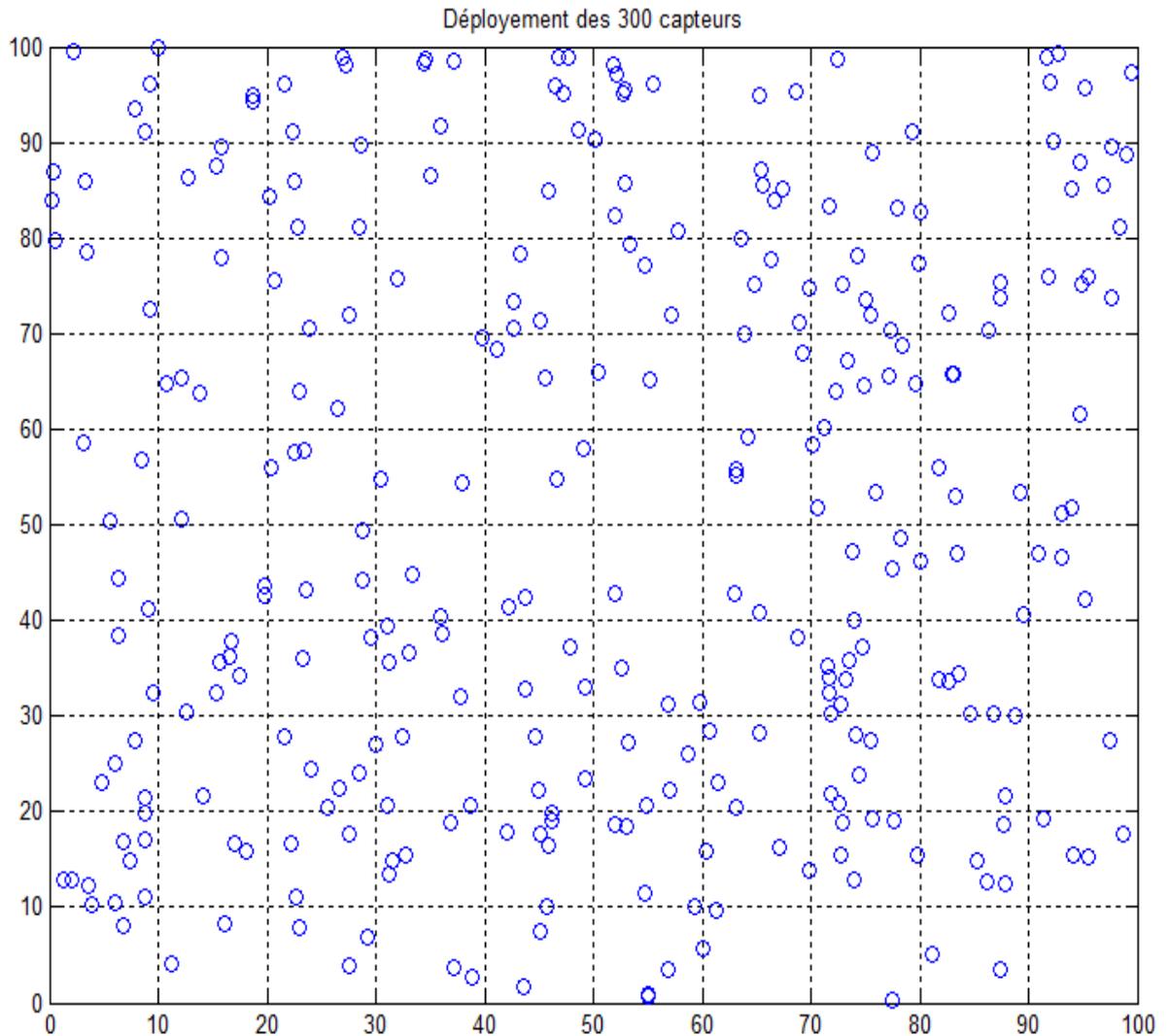


FIGURE 4.3 – Déploiement des capteurs.

- **Création de l'échéancier** : l'échéancier contient tous les événements d'arrivée (les numéros des capteurs interceptant des événements et la date de détection). L'échéancier obtenu pour un nombre d'évènement (exemple : nombre d'évènements= 4) est représenté dans le tableau suivant :

Echéancier d'évènement				
Numéro d'évènement	1	2	3	4
Capteur initiateur	2	5	8	6
Temps d'arrivé	1,6	2,2	2,9	3,5

Tab.4.3:Exemple d'échéancier avec 4 évènements

- **Découverte des voisins** : dans cette phase, la découverte des voisins se base sur une fonction qui permet de renvoyer la liste des capteurs qui sont à sa porté c'est-à-dire, la distance de ses voisins doit être inférieure ou égale à la porté du signal radio (la porté  $P=20m$ ).
- **Application des algorithmes de routage** : à chaque fois qu'un nœud observe un évènement et après la détection du voisinage, il initie le processus de routage. Les protocoles de routage invoqués sont (SGDF et N2E-WSNs) dans le but d'acheminer les données de l'initiateur (capteur source d'évènement) à la station de base.
- **Affichage des résultats** : les courbes obtenues (résultats de la phase précédente) serviront à comparer le protocole SGDF et le protocole N2E-WSNs implémentés selon le critère d'évaluation de performances choisis (les énergies moyennes restantes).

## 4.3 Les résultats de simulation

### 4.3.1 L'énergie restante moyenne

La figure suivante illustre l'estimation de l'énergie moyenne restante du réseau en fonction du nombre d'évènements produit dans le réseau.

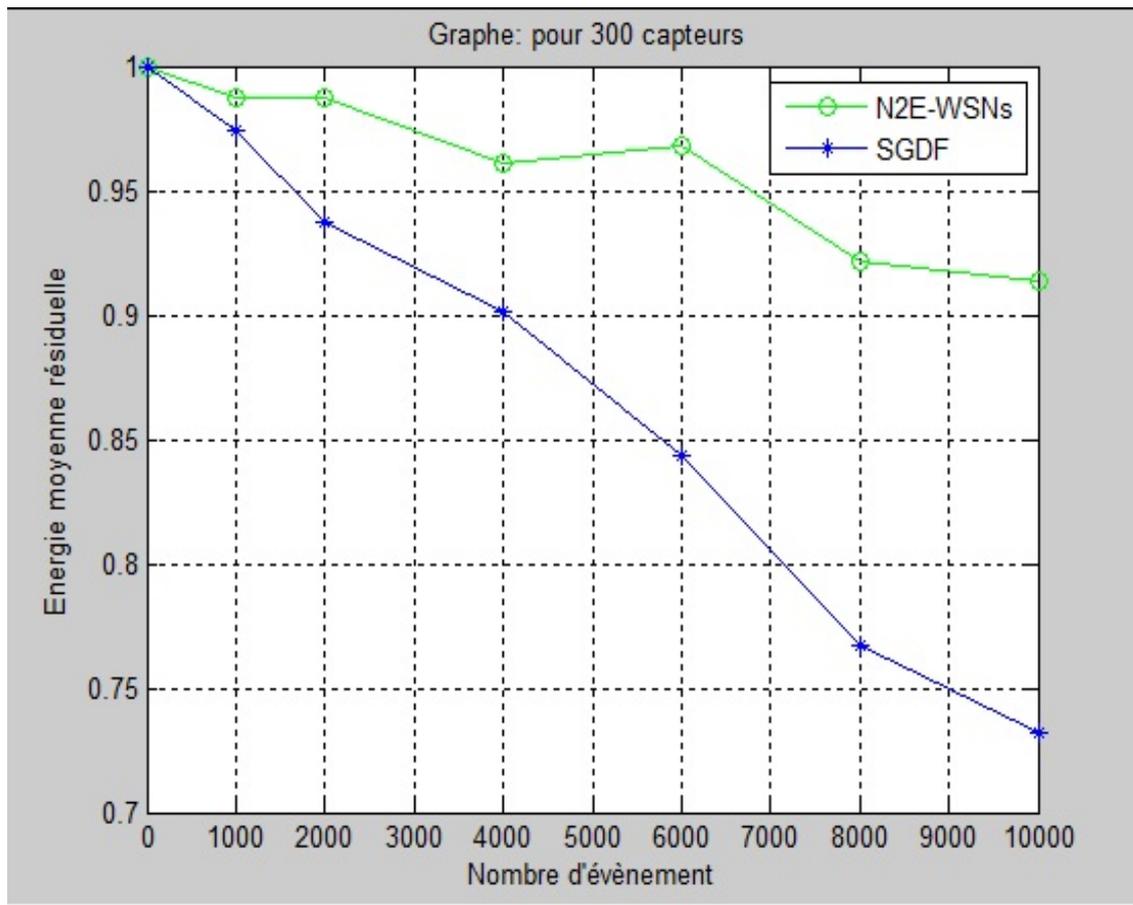


FIGURE 4.4 – Energie moyenne restante.

### SGDF

Nous observons dans la courbe du protocole SGDF (Figure 4.4) une diminution significative du niveau d'énergie résiduelle moyenne du réseau. Nous remarquons aussi que le protocole SGDF consomme environ 26,77 % de l'énergie moyenne du réseau et ceci au bout d'un nombre d'événements égal à 10000.

L'épuisement de l'énergie du réseau revient à la participation de plusieurs nœuds dans le routage, ceci est dû à l'utilisation de deux mode de routage ; Gossiping et Flooding. Ainsi, le choix des voisins qui participent à l'opération du routage qui ne prend pas en considération la contrainte énergétique a eu un impacte négatif quant la à la durée de vie du réseau.

## N2E-WSNs

Nous constatons sur la courbe du protocole N2E-WSNs (Figure 4.4) une légère diminution du niveau d'énergie résiduelle moyenne du réseau. Aussi, nous remarquons que le protocole N2E-WSNs consomme seulement 8,68% de l'énergie moyenne du réseau et ceci au bout d'un nombre d'événements égal à 10000.

Le tableau suivant illustre les énergies résiduelles des deux protocoles pour la totalité des événements ainsi que le gain obtenu.

Nombre d'évènements	0	1000	2000	4000	6000	8000	10000
Er/N2E-WSNs	1.0000	0.9876	0.9875	0.9612	0.9679	0.9212	0.9132
Er/SGDF	1.0000	0.9738	0.9372	0.9014	0.8438	0.7671	0.7323
Gain (%)	0	1.38	5.03	5.98	12.41	15.41	18.09

Tableau 4.4 : Les résultats des énergies résiduelles des deux protocoles

## 4.4 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une comparaison des performances des deux protocoles de routage SGDF et N2E-WSNs à l'aide de la programmation d'une simulation réalisé en MATLAB.

Nous avons introduit nos paramètres de simulation pour lancer la simulation en retirant à chaque fois un événement de l'échéancier. Les résultats obtenus à la fin de simulation présentent l'efficacité de N2E-WSNs en termes de consommation énergétique, ce qui lui permet d'étendre la durée de vie du réseau.

La quantité d'énergie moyenne du réseau consommée par N2E-WSNs est très faible par rapport à celle consommée par le protocole SGDF. Ceci est dû à l'utilisation d'un nombre minimum et suffisant de nœuds pour accomplir la tâche de routage. Dans N2E-WSNs, chaque nœud transmet ses informations au nœud dont la fonction objectif est maximale. Par conséquent, la durée de vie du réseau pour ce protocole est plus grande que celle obtenue avec le protocole SGDF.

# Conclusion et perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu au cours de ces dernières années un grand élan aussi bien dans l'industrie que dans le milieu universitaire. Cela est principalement attribuable à l'ampleur sans précédent des possibilités qu'offre cette technologie. Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'industrie, le bâtiment (capteurs sismiques), l'écologie (contrôle des polluants, du climat et des désastres), le domaine médical ou bien encore le militaire (surveillance). C'est une technologie en plein essor et qui a de très nombreux débouchés.

La vie d'un réseau de capteurs dépend de la durée de vie des nœuds qui le composent. Cette durée dépend, à son tour, de la quantité d'énergie que contiennent les batteries qui ne sont ni remplaçables ni rechargeables, dans la quasi-totalité des cas. La problématique de l'économie de l'énergie est fréquemment posée. C'est pourquoi, il est nécessaire de concevoir un protocole de routage efficace doté d'un mécanisme qui prend en considération la quantité d'énergies résiduelle des capteurs, la distance entre chaque nœud et la station de base, et le nombre de voisins de chaque nœud.

La problématique est de minimiser la consommation d'énergie durant l'acheminement des données vers la station de base. Avant de proposer notre solution à ce problème, nous avons étudié plusieurs protocoles de routage appartenant à différentes catégories afin de s'inspirer de leurs techniques.

Le protocole conçu, nommé N2E-WSNs, appartient à la famille des approches centrées données, avec une structure plate du réseau. Il utilise un nombre minimum et suffisant de nœuds pour accomplir l'opération de routage. Chaque nœud transmet ses informations au nœud dont le nombre de saut est inférieur au sien et dont la fonction objectif, définie à base d'un certain nombre de paramètres, est la plus élevée.

Les résultats de simulation confirment que N2E-WSNs est meilleur que SGDF, car il réduit considérablement la consommation d'énergie dans le réseau, Ainsi, il fourni une plus longue durée de vie du réseau.

Ce travail nous a permis de se familiariser avec Matlab, qui est actuellement est très utiliser pour la création de nombreux simulateurs informatiques.

Comme perspectives, afin de maximiser la durée de vie du réseau, et ce en consommant le minimum d'énergie, nous pensons à éviter la redondance des données. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser la technique d'agrégation des données. Ceci en une combinaison de notre protocole à plat avec un protocole hiérarchique.

Aussi, nous examinerons les résultats du protocole en cas des capteurs mobiles, tester la robustesse du protocole aux erreurs de transmission et aux fautes des capteurs, valider les résultats obtenus par l'implémentation de notre algorithme sur d'autres simulateurs tels que NS2 et JSIM, garantir la qualité de service en minimisant le temps d'acheminement des paquets.

# Bibliographie

- [1] : J. Him, R. Szewczyk et A. Woo. "Systeme architecture for networked sensors". Communication magazine, 2002.
- [2] : Z. Hass, J Halpern, & L. Li. "Gossip-based ad hoc routing". In Proceeding of the IEEE Infocom, New York, USA, Juin 2002.
- [3] : N. Koulalene. "Regroupement avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire de Magistère En Informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués de l'Université de Béjaïa, Algérie, 2009.
- [4] : R. Makhloufi & S. Moade. "Etude et comparaison des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire PFE, Université de Béjaïa, Algérie, 2007.
- [5] : S. Talbi. "Développement d'un protocole de routage avec conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de magistère, Département d'informatique, Ecole doctorale Réseaux et Systèmes Distribués, Université A. MIRA de Bejaïa, Algérie, 2006-2007.
- [6] : M. Sedrati, L. Aouragh, L. Guettala, & A. Bilami. "Etude des performances des protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad-hoc". In 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Novembre 2007.
- [7] : Y. Khenfouci & A. Badaoui. "Approche d'authentification dans les réseaux de capteurs pour la pédagogie", Mémoire d'ingénieur d'état en informatique, Ecole nationale Supérieure d'Informatique (E.S.I, EX. INI), Alger, Algérie, 2008/2009.
- [8] : A. Wang & A. Chandrakasan. "Energy-efficient dsps for wireless sensor networks". IEEE Signal and Processing Magazine, pages 68-78, Juillet 2002.
- [9] : I. F. Akyldiz, W. Su, Y. Sankarasubermaniam, & E. Cayirci. "A survey on sensor networks". IEEE Communication Magazine, pages 102-114, August 2002.
- [10] : D. Ayane M. Zaddi. Conservation d'énergie avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs, Université A. MIRA de Bejaïa, 2008.
- [11] : S. Sentiless. "Architecture logicielle pour capteurs sans fil en réseau". Master

Technologie de l'Internet 2eme année en Informatique, Université de Pau et des pays de l'Adour, France, Jun 2006.

[12] : V. Rajavavivarme, Y. Yang, T. Yang. "An overview of wireless sensor network and application". In Proceeding of the 35 th Southeastern Symposium on System Theory, pages 432-436, 2003.

[13] : R. Benhamed. "La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil ", Centre universitaire de Bechar, Institut des sciences exactes BP : 417- 08000 Bechar, Algérie.

[14] : E. Souto, R. Gomes, D. Sadok & J. Kelner, "Sampling Energy Consumption in Wireless Sensor Networks". IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing -Vol 1 (SUTC'06), June 2006.

[15] : L. Khelladi & N. Badache. "Les réseaux de capteurs : état de l'art". Rapport de recherche, Laboratoire des Systèmes Informatique, Université Bab Ezzouar, Alger, Février 2004.

[16] : Akyildiz I.F, Su W.Sankarasubramaniam Y & Cayirci E. A survey on sensor networks.IEEE Communications Magazine, 40(8) :102-116, August 2002.

[17] : N. Mitton. "Auto-organisation dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle". Thèse de doctorat en informatique et réseaux, INSA de Lyon, INRIA Rhone Alpes, Lyon, France, Mars 2006.

[18] : T. Nieberg, S. Dulman, P. Havinga, L-V. Hoesel, & J. WU. "Collaborative algorithms for communication in wireless sensor networks". Ambient Intelligence : Impact on Embedded Systems, Kluwer Academic Publishers, October 2003.

[19] : A. Hamzi, "Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil". These de magister, INI.2007.

[20] : K. Akkaya & M. Younis. "A survey on routing protocols for wireless sensor networks". Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, 2005.

[21] : R. AKLI & K. BADER. "Nouveau protocole de routage géographique à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil".Mémoire PFE, Université A. MIRABejaia, Algérie, 2009.

[22] : B. Krishnamachari, D. Estrin, & S.Wicker. "Modelling data-centric routing in wireless sensor networks". In Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2002.

[23] : M. Achir & L. Ouvry. "A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi Path Source Routing Protocol (MPSR)". ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE), Ile de la Réunion, Avril 2005.

[24] : Wendi RabinerHeinzlman, Joanna Kulil, & HariBalakrishnan. "Adaptative Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks". Cambridge

MA02139, 2001.

[25] : I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks : a survey" , Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, v.38 n.4, 2002.

[26] : C. Andrea, L. Thé Van & Marill Guillaume. "Optimisation par colonies de fourmis", mai 2006.

[27] : Wei Yen, ChingWei Chen, Cheng-hsiang Yang. "Single gossiping with Directional Flooding Routing Protocol in Wireless Sensor Networks". Département des techniques et sciences informatiques, Université de Tatung, 2008.

[28] : C.J Leuschner, Master of Engineering. "The design of a simple energy efficient routing protocol to improve wireless sensor network lifetime". University of Pretoria, 2005.

[29] : W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan. "Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks". Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences. Vol. 2, 2000.

[30] : S. Lindsey & C. Rachavand. "Pegasis : Power efficient gathering in sensor information systems". In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, volume 3, 2002.

[31] : EDARP

[32] : Y. Xu, J. Heidemann, & D. Estrin. "Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing". Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 70-84, ACM Press New York, NY, USA, 2001.

[33] : Y. Yu, R. Govindan, & D. Estrin. "Geographical and energy-aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks". Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, Mai 2001.

[34] : N. Thepvilojanapong. "A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks". PhD Thesis, A Dissertation Submitted to the Department of Information and Communication Engineering, the University of Tokyo, Décembre 2005.

[35] : H. Takagi, L. Kleinrock, "Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals", IEEE Transactions on Communications, Vol. 32, no. 3, Mars 1984.

[36] : Ya. Xu, John Heidmann, IEEE, & Deborah Estrin. "Geography informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing", 2001.

- [37] : T. He et al, "SPEED : A stateless protocol for real-time communication in sensor networks", in the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, Mai 2003.
- [38] : C-K. Toh. "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad-hoc networks". IEEE Communications Magazine, 39(6) :138-147, Juin 2001.
- [39] : S. Boulefkar. "Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs". Mémoire de Magistère En Informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués de l'Université de Bejaia, 2006.
- [40] : C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin. "Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks". Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking, 2000.
- [41] : M. Achir & L. Ouvry. "A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-Path Source Routing Protocol (MPSR)". ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE), Ile de la Réunion, Avril 2005.
- [42] : Yunfeng Chen & Nidal Nasser, "Energy-Balancing Multipath Routing Protocol", Department of Computing and Information Science University of Guelph, Waterloo, Ontario, Canada August, 2006.
- [43] : J. Kim, K. H. Yoon & S. Lee, "modified - An Energy-Aware Virtual Backbone Tree for Wireless Sensor Networks", Suwon, S. Korea ACM 978-1-60558-405-8. Janvier 2009.
- [44] : B. Zhou, A. Marshall, & T. H. Lee, "An Energy-Aware Virtual Backbone Tree for Wireless Sensor Networks", Proceedings of IEEE GLOBECOM, vol. 3, pp 162-167, 2005.
- [45] : Saoucene Mahfoudh & Pascale Minet. "Energy Optimized Link State Routing", Journal of Interconnection Networks, JOIN, AINA 2008.
- [46] : C. Adjih, T. Clausen, P. Jacquet, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum L. Viennot, "Optimized Link State Routing Protocol", RFC 3626, IETF, 2003.
- [47] : R. Zitouni. "Routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de Magistère de l'Université de Bejaia, 2006.
- [48] : Karl H. Willig A. "Protocols and architectures for wireless sensor networks". John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [49] : Mohammad Ilyas & Imad Mahgoub. "Handbook of sensor Networks Compact Wireless and Wired Sensing Systems". Number 0-8493-1968-4. CRC PRESS

LLS,USA, 2005.

[50] : V. Raghunathan, C. Schrgers, S. Park, & M-B. "SRIVASTAVA.Energy-aware wireless microsensorsnetworks".IEEE Signal Processing Magazine, 19(2) :40-50, Mars 2002.

[51] : S. Ziane A. Mellouk,"A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad networks". Systems Communications, IEEE, Aug 2005.

[52] : G-J. Pottie W-J. Kaiser. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, 43(5) :51-58, Mai 2000

[53] : S. Jain."Energy aware communication in ad-hoc networks".Technicalreport, UW-CSE, Juin 2003.

[54] : B. Abdelmalik. "Allongement de la durée de vie des réseaux sans fil de capteurs par l'optimisation des protocoles de routage et d'accès au canal". Institut National Polytechnique de Grenoble, 29 Janvier 2007.

[55] : S. Moad."La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Etude Bibliographique Master Recherche 2 en Informatique IFSIC-Rennesl, France, 2008.

[56] : H. Idoudi, W. Akkari, A. Belghith, & M. Molnar. "Alternance synchrone pour la conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc", Institut National de recherche en Informatique et en Automatique, INRIA, Décembre 2006.

[57] : R. Kacimi. "Techniques de consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil", Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 28 Septembre, 2009.

[58] : F. Claerhout. Suivi de cible dans un réseau de capteurs. Etude bibliographique de master 2, IFCIC Université de Rennesl, campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France, 2005.

[59] : J. Cartigny, D. Simplot, & I. Stojmenovic. "Localized minimumenergy broadcasting in ad-hoc networks".In Proceedings of the IEEE Infocom, San Francisco, USA, Avril 2003.

[60] :S-Y. IN & al."The broadcast strom problem in mobile ad hoc network". In Protoceedings of the IEEE/ ACM Mobicom, 1999 [61] : M. SUN, W. FENG, & T-H. LAI.Location aided broadcast in wireless ad hoc networks. In Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2001, page 2842-2846, San Antonio, TX, Novembre 2001.

[62] :Y. Zhang, & L. Cheng, "Flossipng : A New Routiing Protocol for Wireless Sensor Network", IEEE International Conference on Networking, Sensing and control,2004. Vol. 2, pp. 1218-1223, 2004.

- [63] :A. Mani, H. Ariouate. " Protocole de routage avec minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire de Master Recherche En Informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués de l'Université de Bejaia, Algérie, 2009-2010.
- [64] : L.Boualouche. "Modélisation et Simulation des Systèmes Informatiques et réseaux de télécommunication ". Département d'Informatique / Ecole Doctorale en Informatique,université de Béjaia, 2009.
- [65] : M. Achir. "Technologie basse consommation pour les réseau Ad-Hoc". PhD thesis, Institut national Polytechnique de Grenoble, July 2005.