

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia - Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Mathématiques et Informatique



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en
informatique

Option: Systèmes Intelligents

Thème

Une nouvelle technique d'optimisation pour l'économie
d'énergie dans le réseau de capteur sans fils

Préparé par

AbdelghaniBOUHAMIDI et Khaled HAMIDATOU

Encadré par

Mr. Mohammed KADDI

Année Universitaire 2017/2018

Résumé

Dans les réseaux sans fil, les protocoles de routage permettent d'établir des routes entre les nœuds pour acheminer les paquets entre eux. Cependant, dans les réseaux de capteurs, les protocoles de routage établissent des routes entre tout nœud du réseau et la station de base pour assurer la fidélité de routage. Dans cette optique, plusieurs protocoles ont été proposés dans la littérature. Il y en a de nouveaux protocoles qui ont été développés comme il y en a des protocoles qui sont des améliorations des autres et essaient de combler les limitations des versions originales. Dans ce travail nous proposons une nouvelle technique d'optimisation pour l'économie d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil appelée Arbre Corrélation (Arb-Corr) en utilisant la structure d'arbre comme protocole de routage pour réduire la distance de transmission des données des nœuds à station de base.

Mots clé: Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de routage, Économie d'énergie, Arb-Corr.

Abstract

In wireless networks, routing protocols allow establishing routes between nodes to route packets between them. However, in sensor networks, routing protocols establish routes between any network node and the base station to ensure routing fidelity. In this respect, several protocols have been proposed in the literature. There are new protocols that have been developed as there are protocols that are improvements to others and try to fill the limitations of the original versions. In this work we propose a new optimization technique for energy saving for wireless sensor networks called Arb-Corr using tree structure as a routing protocol to reduce the data transmission distance of nodes. at base station.

Keywords: Wireless sensor network, routing protocols, energy saving, Arb-Corr.

Remerciements

Avant tout nous remercions "Allah" tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce modeste travail. Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. KADDI Mohammed**, qui a bien voulu encadrer notre travail, qui nous a fait profiler de son savoir, de son expérience et pour ses conseils.*

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour l'honneur d'avoir voulu examiner et évaluer cette modeste contribution.

Nous remercions tous les professeurs qu'il nous enseigné dans cette année et aussi mes amis pour leurs soutient.

Finalemnt, nous remercions tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.

M.Abdelghani BOUHAMIDI et M.Khaled HAMIDATOU

Dédicace

Je dédie ce travail

*Aux êtres les plus chers à mon coeur,
ma mère et mon père et ma famille.*

*À tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à
obtenir mon diplôme de Master en informatique.*

À tous mes amis.

Et enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

M.Abdelghani BOUHAMIDI

Dédicace

Je dédie ce travail

À toute ma famille

*À tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à
obtenir mon diplôme de Master en informatique.*

À tous mes amies.

*Et à tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin pour terminer ce
projet.*

M.Khaled HAMIDATOU

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract	I
<i>Remerciements</i>	II
<i>Dédicace</i>	III
Table des matières	V
Table des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	X
Table des acronymes.....	XI
Introduction générale.....	1
Chapitre 1	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Capteur.....	4
1.2.1 Définition d'un Capteur.....	4
1.2.2 Architecture d'un capteur	5
1.3 Réseau de capteur sans fils	7
1.3.1 Définition d'un RCSF.....	7
1.3.2 Composants d'un RCSF.....	8
1.4 Facteurs des RCSFs	8
1.4.1 Durée de vie du réseau.....	8
1.4.2 Ressources limitées	8
1.4.3 Topologie dynamique.....	8
1.4.4 Agrégation des données.....	9
1.4.5 Facteur d'échelle (La scalabilité)	9
1.4.6 Bande passante limitée	9
1.4.7 Sécurité physique limitée	9
1.5 Pile Protocolaire	9
1.6 Domaine d'application des RCSFs	12

Chapitre 2	14
2.1 Introduction.....	15
2.2 Notion de durée de vie d'un réseau.....	15
2.3 La consommation d'énergie d'un nœud CSF	16
2.3.1 Niveau capture	16
2.3.2 Niveau traitement	16
2.3.3 Niveau communication	17
2.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	17
2.4.1 Etat du module radio.....	17
2.4.2 Accès au médium de transmission	18
2.4.2.1 La retransmission	18
2.4.2.2 L'écoute active.....	18
2.4.2.3 La sur écoute	18
2.4.2.4 Surcharge.....	18
2.4.2.5 La surémission	19
2.4.2.6 La taille des paquets	19
2.4.2.7 Modèle de propagation radio	19
2.5 Les sources de gaspillage d'énergie	19
2.5.1 L'écoute passive (idle)	19
2.5.2 Les collisions	20
2.5.3 La puissance de transmission	20
2.5.4 Les distances de transmission	20
2.5.5 L'écoute abusive (Overhearing)	20
2.5.6 Le surcoût des paquets de contrôle (Overhead)	20
2.6 Technique de minimisation de la consommation d'énergie	21
2.7 Conclusion	23
Chapitre 3	24
3.1 Introduction.....	25
3.2 Classification des protocoles de routage pour les RCSFs	26

3.2.1	Selon la topologie (structure) du réseau	27
3.2.2	Selon les paradigmes de communication.....	28
3.2.3	Selon le mode de fonctionnement du protocole	29
3.2.4	Selon le mode l'établissement des chemins	30
3.3	Exemples des protocoles de routage dans les RCSFs	31
3.3.1	Propagation et discussion (flooding and gossiping)	31
3.3.2	Directed Diffusion(DD)	31
3.3.3	Rumor Routing (RR).....	32
3.3.4	Sensor Protocols for Information via Negotiation: (SPIN).....	32
3.3.5	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)	34
3.3.6	Cougar [25].....	35
3.3.7	ACQUIRE (Active Query Forwarding in Sensor Networks) [26]	35
3.3.8	Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) [27]:.....	35
3.3.9	Sequential Assignment Routing (SAR).....	36
3.3.10	SPEED [32].	36
3.3.11	TEEN et APTEEN :.....	36
3.4	Classification des différents protocoles de routage dans les RCSFs	37
Tableau 3.1 Classification des différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs.....		37
3.5	Conclusion	37
Chapitre 4		39
4.1	Introduction.....	40
4.2	Langage utilisé.....	40
4.3	Le modèle du système.....	41
4.3.1	Le modèle réseau	41
4.3.2	Le modèle de dissipation de l'énergie.....	41
4.4	Description de notre approche	42
4.5	Organigrammes notre approche.....	44
4.5.1	La phase d'initialisation (la phase de déploiement).....	44
4.5.2	La phase de transmission des données (construction d'arbre).....	44

4.6	Implémentation.....	46
4.6.1	Interface du simulateur	46
4.6.2	Résultats de simulation	48
4.7	Conclusion	51
	Conclusion générale	52
	Bibliographie	54

Table des figures

Figure 1.1 Rôles d'un capteur	4
Figure 1.2 Architecture d'un capteur	5
Figure 1.3 Réseau de capteur sans fils (RCSF)	7
Figure 1.4 Pile protocolaire des réseaux de capteurs	10
Figure 1.5 Domaine d'application des RCSFs	13
Figure 2.1 La sur écoute dans une transmission.....	18
Figure 2.2 Les techniques de conservation d'énergie.....	21
Figure 3.1: Classification des protocoles de routage pour les Réseaux de capteurs sans fil.....	26
Figure 3.2 Topologie plate.....	27
Figure 3.3 Routage hiérarchique.....	28
Figure 3.4 Les phases de communication du protocole Directed Diffusion.....	32
Figure 3.5: Le protocole SPIN.....	33
Figure 4.1: Le modèle de dissipation de l'énergie.....	42
Figure 4.2: Les niveaux de la zone de simulation.....	43
Figure 4.3: Architecture de protocole proposé.....	43
Figure 4.4: Organigramme de la phase d'initialisation (déploiement).....	44
Figure 4.5: Organigramme de la phase de transmission des données (construction d'arbre).....	45
Figure 4.6 : Interface du simulateur Arb-Corr.....	46
Figure 4.7: Paramètres de simulation.....	47
Figure 4.8: Zone de simulation.....	47
Figure 4.9: Résultats de simulation.....	48
Figure 4.10:Affichage des graphes.....	48
Figure 4.11: Nombre de données transmises à la SB Vs nombre de rounds.....	49
Figure 4.12: Nombre de nœuds vivants Vs nombre de rounds.....	50

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Classification des différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs.....	37
Tableau 4.1: Caractéristiques matérielles.....	40
Tableau 4.2: Paramètres de simulation.....	48

Table des acronymes

ADC:	Analog to D igital C onverter.
APTEEN:	Adaptive P eriodic T EEN.
BS:	B ase S tation.
CHs:	C luster H eads.
DVS:	D ynamic V oltage S caling.
GPS:	G lobal P ositioning S ystem.
LEACH:	L ow E nergy A daptive C lustering H ierarchy.
MAC:	M edia A ccess C ontrol.
MEMS:	M icro E lectro- M echanical S ystems.
RCSFs:	R éseaux de C apteurs S ans F il.
TEEN:	T hreshold sensitive E nergy E fficient sensor N etwork
WSN:	W ireless S ensor N etwork.
DD:	D irected D iffusion.
RR:	R umor R outing.
SAR :	S equential A ssignment R outing
QoS :	Q ualité d e S ervice.
QoS:	Q uality of S ervice.
SPIN:	S ensor P rotocolsfor I nformationvia N egotiation.
SQL :	S tructured Q uery L anguage
Arb_Corr	A rbre C orrélation

Introduction générale

Les avancées technologiques réalisées dans les domaines de la microélectronique et de la communication sans fil ont permis de concevoir et de fabriquer des composants miniaturisés, autonomes et fiables tels que les capteurs. En effet, déployés sur une surface géographique importante formant un réseau de nœuds capteurs afin de collecter des informations sur des événements bien définis, et de les acheminer vers un nœud particulier de traitement, appelé puits (Sink) ou bien station de base (SB). Les informations collectées servent à construire une vision globale de la zone couverte pour prendre des décisions.

Cependant, la maîtrise de la consommation d'énergie par les réseaux capteurs et la maximisation de leur durée de vie restent les problématiques les plus fondamentales car les capteurs sont de petits composants avec une faible capacité de stockage, de calcul et sont alimentés par des batteries dont la capacité est très limitée et qui sont généralement non rechargeables. Par exemple, dans certaines applications où les capteurs sont déployés dans des zones hostiles, il est difficile voire impossible de changer les batteries. C'est le cas pour les applications conçues pour le réchauffement climatique et la surveillance de la variation de la température au pôle nord où il n'est pas pratique de mettre en place une équipe ou de l'envoyer chaque fois pour changer les batteries des capteurs. Donc, pour qu'un réseau de capteurs reste autonome pendant une longue durée (quelques mois ou quelques années) et ait par la suite une longévité maximale, il faut que la consommation d'énergie soit prise en compte à tous les niveaux de l'architecture réseaux (de la couche physique à la couche application).

Les progrès récents dans les réseaux de capteurs sans fil ont conduit au développement de nombreux protocoles spécifiquement conçus pour les réseaux de capteurs où la présentation de l'énergie est un facteur essentiel.

Dans notre mémoire, nous allons présenter et implémenter le protocole Arbre Corrélation (Arb-Corr), dans le but d'étudier l'impact de protocole dans la problématique de la consommation d'énergie et faire une étude comparative entre trois scénarios proposés en utilisant l'environnement Borland C++ Builder2010 version 14.0.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres:

Chapitre 1: Généralités sur le réseau de capteur sans fils

Le premier chapitre décrit l'architecture d'un capteur et présente les principes et les caractéristiques des réseaux de capteurs aussi que ses domaines d'application.

Chapitre 2: Consommation& Économie d'énergie dans les RCSFs

Dans ce deuxième chapitre en définissant la durée de vie des réseaux de capteurs et en synthétisant les différentes techniques et mécanismes de conservation d'énergie que nous avons recensés dans la littérature.

Chapitre 3: Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Ce chapitre est présenté la classification des protocoles de rouage pour les RCSFs avec des exemples des protocoles de routage.

Chapitre 4: Contribution & Implémentation

Dans ce chapitre nous avons présenté l'implémentation de protocole Arbre Corrélation(Arb_Corr) dans l'environnement Borland C++ Builder2010 version 14.0, et comparé les résultats entre les trois scénarios.

Enfinement une conclusion générale est donnée pour synthétiser notre travail, et proposer des perspectives de recherche.

Chapitre 1

Généralités sur le réseau de capteur sans fils

Sommaire

1.1 Introduction

1.2 Capteur

1.3 Réseau de capteurs sans fil

1.4 Facteurs des RCSFs

1.5 Pile protocolaire

1.6 Domaine d'applications des RCSFs

1.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, les avancées récentes dans le domaine de communication sans fils et les technologies « MEMS » (Micro-Electro-MechanicalSystems) ont permis de produire à un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. Ces derniers, appelé micro-capteurs sont dotés des moyens qui leur permettent de collecter, de stocker, de traiter et de transmettre les données collectées à un centre de collecte via un médium sans fil. Ainsi, il devient facile de déployer les capteurs dans des endroits parfois même difficiles d'accès, pour former les réseaux de capteurs sans fils, en évitant l'usage des câbles, utilisées depuis longtemps qui avait comme principaux inconvénients d'être encombrants et couteux.

Dans ce chapitre, nous allons voir en détails la définition et l'architecture d'un capteur, ainsi les réseaux de capteurs sans fils et leurs composant, et les facteurs des RCSF, et aussi la pile protocolaire de RCSF et dernièrement les domaines d'applications de RCSF.

1.2 Capteur

1.2.1 Définition d'un Capteur

Organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande[1].

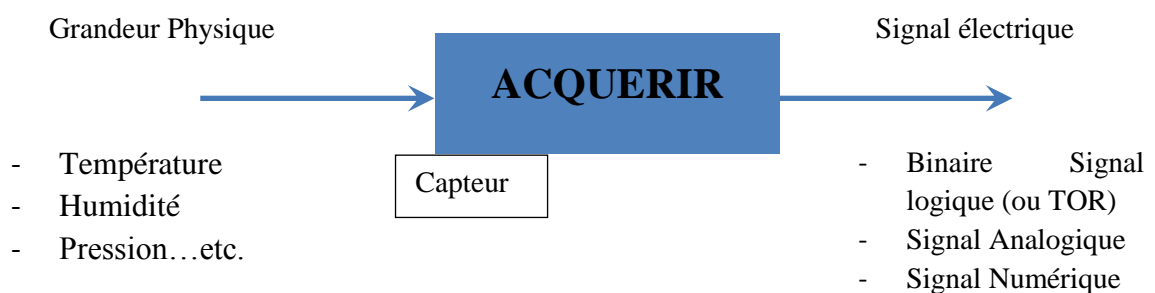


Figure 1.1:Rôles d'un capteur

1.2.2 Architecture d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteur sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression ...etc. cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé principalement d'une unité de: captage, traitement, stockage, communication, et d'énergie. Des composant additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application, comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (GolbalPositionning System), un générateur d'énergie (Exemple : Cellules Solaires) ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer. Ces éléments principaux et optionnels sont détaillés dans la figure suivante[1].

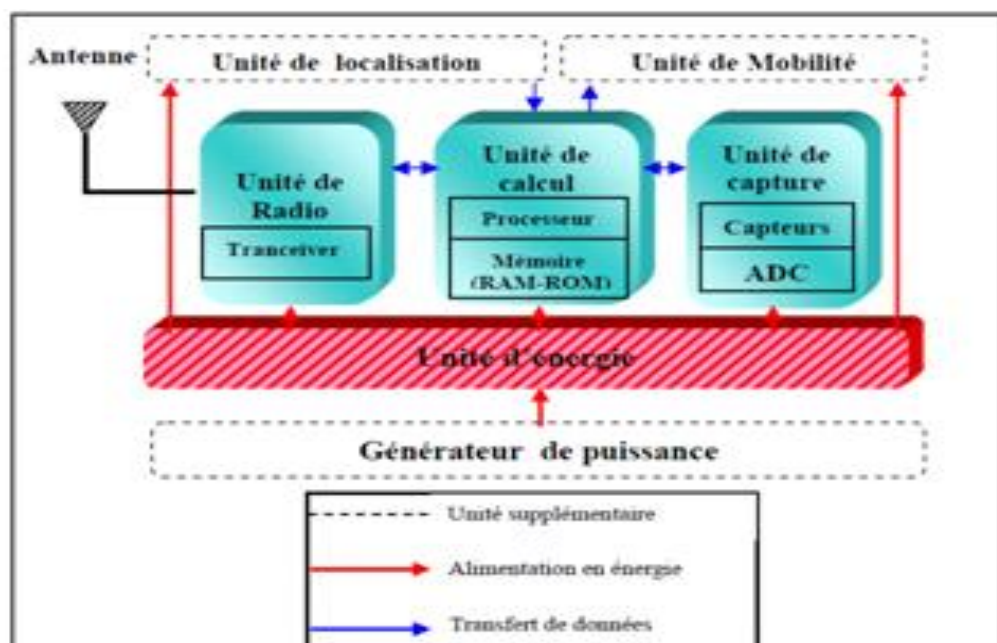


Figure 1.2 Architecture d'un capteur

Unité de captage

Le capteur est généralement composée de deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique a capté) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Il fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique (CAN). Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage.

Unité de traitement

Elle comprend un processeur généralement associé à une petite unité de stockage (inclut la mémoire de programme et la mémoire de données). Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (TinyOS, ZigBee, SOS par exemple). Elle exécute les protocoles de communications qui permettent de faire « collaborer » le nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits.

Unité de Communication

Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un médium « sans-fil ». Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radio-fréquence.

- Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, ne pouvant pas établir de liaisons à travers des obstacles, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes.
- Les unités de communication de type radio-fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ceci implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur.

Concevoir des unités de communication de type radio-fréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante. L'alternative consistant à utiliser de longues antennes n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs.

Unité d'énergie

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie). Étant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est limitée et généralement non-remplaçable. Ceci fait souvent de l'énergie de la ressource la plus précieuse d'un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et donc du réseau entier. L'unité d'énergie constitue donc une partie essentielle du système. Elle doit répartir l'énergie disponible aux autres modules, de manière optimale (par exemple en réduisant les dépenses inutiles et en mettant en veille les composants inactifs). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement via des cellules photovoltaïque par exemple. Afin d'étendre la durée de vie totale du réseau.

1.3 Réseau de capteur sans fils

1.3.1 Définition d'un RCSF

Un réseau de capteur sans fil - Wireless Sensor Networks (WSN) – est considéré comme un type spécial de réseau ad hoc (où l'infrastructure de communication et l'administration centralisée sont absentes). Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils sont dispersés aléatoirement à travers une zone géographique, appelée champ de captage, qui définit le terrain d'intérêt pour le phénomène capté. Les données captées sont acheminées grâce à un routage multi-saut à un nœud considéré comme un "point de collecte", appelé nœud puits (ou sink). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet ou un satellite. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits.[2].

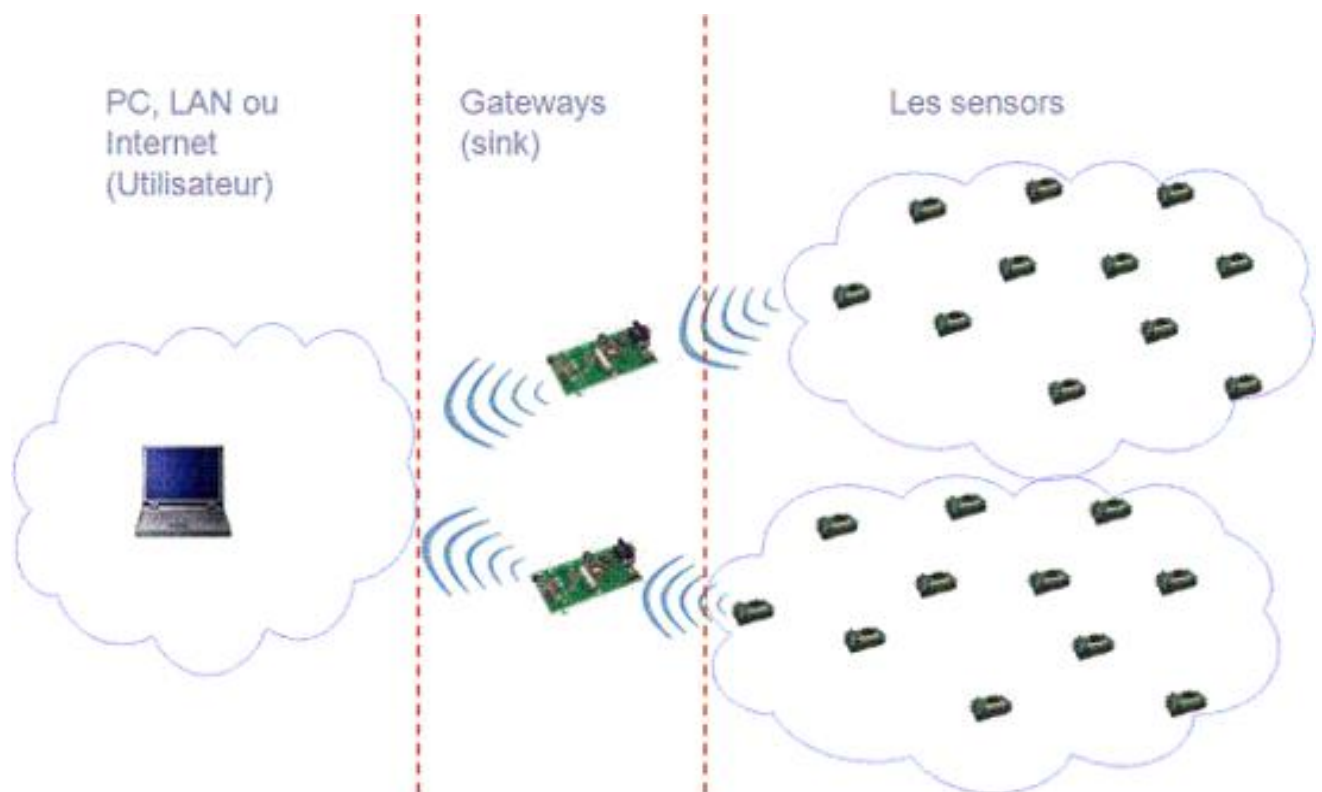


Figure 1.3 Réseau de capteur sans fils (RCSF)

1.3.2 Composants d'un RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil se composent de quelques éléments principaux :

- **Administrateur:** représente la personne qui est responsable sur le réseau, il gère le réseau (Maintenance, sécurité ...etc.), mentionne les divers évènements signalés par le réseau.
- **Puits (Sink):** représente le trait d'union entre l'administration et le champ de captage, il fonctionne d'une manière autonome et effectue plusieurs tâches simultanément à l'échange d'informations. Ce dernier est un point de collecte de données capturées, il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'internet ou un satellite.
- **Les nœuds (Capteurs/ Sensors):** Un capteur est un dispositif autonome capable d'acquérir les données sur son environnement immédiat, les traiter et les communiquer.[3].
- **Champ de captage:** C'est l'endroit où les capteurs doivent être déployés, il peut être forêt, frontière, administration ou même le corps humain...etc.[3].

1.4 Facteurs des RCSFs

Parmi les facteurs et les contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs, nous citons les suivants :

1.4.1 Durée de vie du réseau

C'est le temps écoulé entre l'instant de déploiement et l'instant où le réseau devient incapable de réaliser correctement sa tâche à laquelle il a été dédié.

1.4.2 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. En conséquence, la capacité de traitement et de mémoire est très limitée.

1.4.3 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 peut donc être très probable. De plus, les nœuds capteurs et les nœuds finaux où ils doivent envoyer l'information capturée peuvent être mobiles.

1.4.4 Agrégation des données

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs sont très reliées, ce qui implique l'existence de redondances de données. Une approche répandue consiste à agréger les données au niveau des nœuds intermédiaires afin de réduire la consommation d'énergie lors de la transmission de ces données.

1.4.5 Facteur d'échelle (La scalabilité)

Les réseaux de capteurs engendrent un très grand nombre de capteurs, ils peuvent atteindre des milliers voir des millions de capteurs. Le défi à relever par les RCFSs est d'être capable de maintenir leurs performances avec ce grand nombre de capteurs.

1.4.6 Bande passante limitée

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

1.4.7 Sécurité physique limitée

Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui minimisent le contrôle des données transmises.

1.5 Pile Protocolaire

La pile de protocoles utilisée par le puits (Sink) ainsi que par tous les nœuds-capteurs est donnée dans la Figure 1.4, cette pile de protocoles combine routage et gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseau. Elle communique de manière efficace (en termes d'énergie) à travers le support sans fils et favorise les efforts de coopération entre les nœuds-capteurs. La pile de protocoles comprend une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique, un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches.

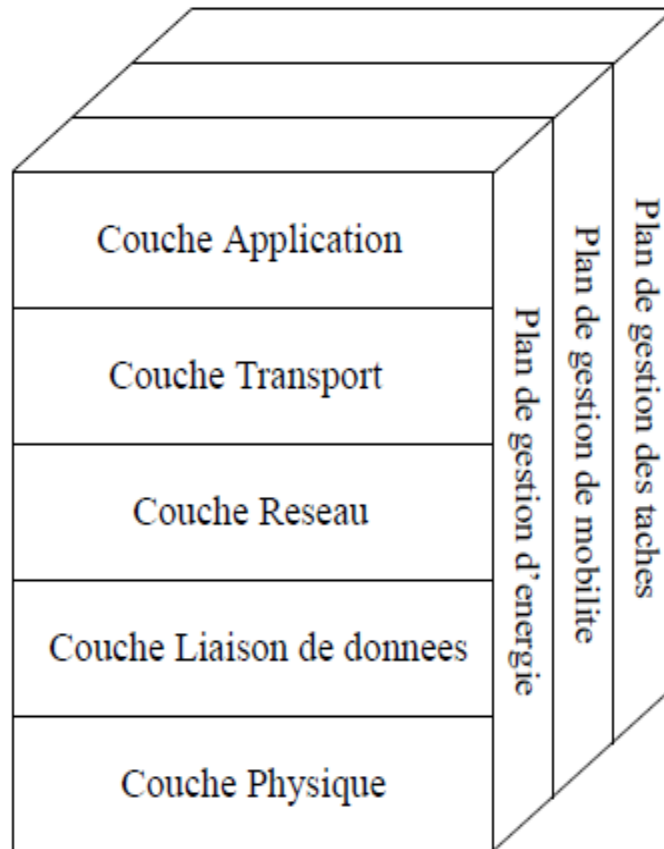


Figure 1.4 Pile protocolaire des réseaux de capteurs

➤ La couche physique

La couche physique est responsable de :

- La sélection des fréquences porteuses.
- La détection du signal.
- La modulation.

Couche liaison de données

En générale, cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et le verrouillage des trames de données, du contrôle d'accès aux média (MAC : Media Access Control), et du control des erreurs. Elle assure une connexion fiable (point à point ou à point à multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs.

Couche Réseau

Le but principal de la couche réseau est de trouver une route et une transmission fiable des données captées, des nœuds capteurs vers le puits en optimisant l'utilisation de l'énergie descapteurs. Les caractéristiques spécifiques aux RCSFs exigent que leurs protocoles de routage diffèrent de ceux des réseaux ad hoc traditionnels.

La couche transport

Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquet, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

La couche application

La couche application constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple : internet). Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

Quant aux niveaux (plans) intégrés dans la pile protocolaire, ils ont les fonctions suivantes:

➤ Le plan de gestion d'énergie

Un nœud de capteurs sans fil, nécessite seulement une source d'énergie limitée (<0.5 Ah, 1.2 V). La vie du nœud montre une dépendance forte à l'égard de la batterie. Le plan de gestion d'énergie doit gérer la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Par exemple le nœud doit se mettre en sommeil après la réception d'un message à partir d'un voisin afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus.

Le plan de gestion de mobilité

Puisque les nœuds peuvent être mobiles, un système de gestion de mobilité doit exister. Un tel système doit être capable d'enregistrer les mouvements du nœud afin de l'aider à se localiser.

Le plan de gestion de tâche

Lors d'une opération de captage dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme, cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

1.6 Domaine d'application des RCSFs

Les RCSF ont su attirer un nombre croissant d'industriels, vu leur réalisme et leur apport concret. En effet, les besoins d'un suivi continu d'un environnement donné est assez courant dans diverses activités de la société. Les processus industriels, les applications militaires, le monitoring d'habitat, ainsi que l'agriculture de précision ne sont que quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications possibles du suivi continu offert par les RCSF. Parmi elles, nous citons :

➤ **Le domaine militaire:**

Les RCSFs sont utilisés dans le domaine militaire pour avoir une meilleure connaissance de la zone de combat en particulier l'état des troupes et de l'armement, les changements de topologie du terrain, la détection et la collecte d'informations sur la position de l'ennemi, la reconnaissance des attaques nucléaires ou chimiques, surveillance des zones hostiles, détection d'attaques nucléaires, biologiques chimique et bactériologiques...

➤ **L'environnement:**

Les capteurs peuvent être déployé pour la détection et la localisation des événements environnementaux, tel que les séismes, des feux de forêt, des inondations, de polluants dans l'air ou dans le sol. D'autres études incluent la Bio-complexité de l'environnement, la radioactivité et l'agriculture.

➤ **Domotique:**

On peut citer l'automatisation de la maison par la communication des différents éléments comme le four, le lave-vaisselle, la télévision, etc. on peut aussi les utiliser pour l'étude de l'environnement de la maison et créés des systèmes plus ergonomiques et esthétiques.

➤ **Le domaine médical:**

Les RCSFs servent la chirurgie, la détection des cellules cancéreuses, la télésurveillance des données physiologiques, la localisation des patients et des médecins à l'intérieur d'un hôpital ainsi que pour l'administration des doses précises de médicaments.

➤ **Le domaine des transports:**

Gestion du trafic routier, ferroviaire, Radars...etc.

➤ **Le domaine commercial:**

Des nœuds capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison (pour garantir la chaîne du froid en particulier). Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Un client attendant un paquet peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la

position du paquet. Des entreprises manufacturières, via des réseaux de capteurs pourraient 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 tout en réduisant leurs coûts. Les produits en fin de vie pourraient être mieux démontés et recyclés ou réutilisés si les micro-capteurs en garantissent le bon état.[3].

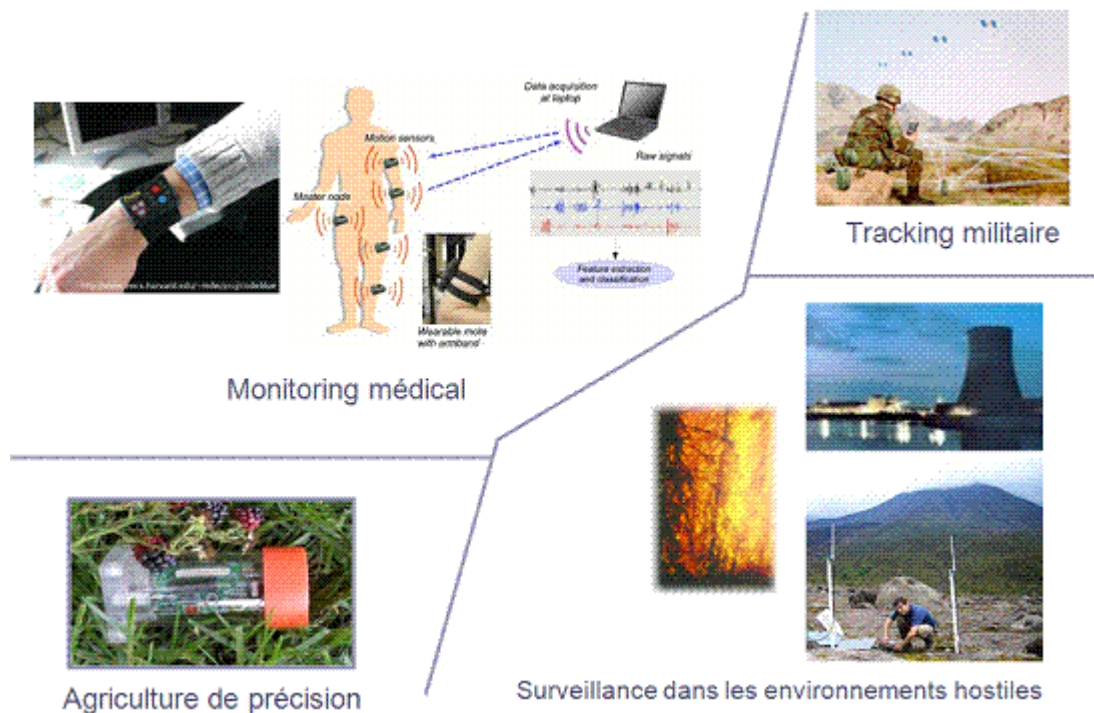


Figure 1.5 Domaine d'application des RCSFs

Chapitre 2

Consommation & Économie d'énergie dans les RCSFs

Sommaire

2.1 Introduction

2.2 Notion de durée de vie d'un réseau

2.3 La consommation d'énergie d'un nœud CSF

2.4 Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie

2.5 Les sources de gaspillage d'énergie

2.6 Technique de minimisation de la consommation d'énergie

2.7 Conclusion

2.1 Introduction

La durée de vie est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs. En effet, dans un environnement contraint, toute ressource limitée doit être prise en compte. Toutefois, la durée de vie du réseau, comme mesure de la consommation d'énergie, occupe une place exceptionnelle puisqu'elle constitue la borne supérieure de l'utilité de ce réseau. La durée de vie est également considérée comme un paramètre fondamental dans un contexte de disponibilité et de sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil.

Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à piles continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

Suite à l'introduction du chapitre précédent, nous présentons dans ce chapitre la consommation et l'économie d'énergie dans les RCSFs.

2.2 Notion de durée de vie d'un réseau

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

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

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

- La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie.
- La durée jusqu'à ce que le premier CH (Cluster Head) épuise toute son énergie.

- Demi-vie du réseau: la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner.
- La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie.

2.3 La consommation d'énergie d'un nœud CSF

Cette section met en relief la consommation énergétique au niveau des différents composants d'un nœud capteur sans fil. Un nœud capteur sans fil est un dispositif électronique ou encore électromécanique multi composant. Il est essentiellement composé, selon ce qui est généralement retenu dans la littérature, de quatre composants de base: l'unité de capture comportant un ou plusieurs capteurs accompagnés de convertisseurs analogique-numérique, l'unité de traitement (microcontrôleur + mémoire), l'unité de transmission (émetteur -récepteur + antenne) et l'unité d'énergie.[4,5] Nous allons nous focaliser sur la consommation de ces composantes de base. Néanmoins, selon le type d'application, un nœud peut être équipé d'autres composantes, comme une unité mobile pour déplacer le nœud ou changer l'orientation de l'antenne, une unité de géolocalisation pour déterminer la position du nœud, entre autres. Étant donné que ces derniers sont optionnels, ils ne seront pas considérés dans cette section.

2.3.1 Niveau capture

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches d'échantillonnage, de traitement du signal, de conversion analogique/numérique et d'activation/désactivation de la sonde du capteur. En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de la consommation globale d'un nœud donné. Mais, selon les exigences de certaines applications, elle peut s'avérer non négligeable[6].

2.3.2 Niveau traitement

L'énergie de traitement représente la quantité d'énergie dissipée pour le traitement des instructions (énergie de commutation) mais aussi pour le fonctionnement du microcontrôleur et des mémoires (énergie de fuite). Cette quantité d'énergie est négligeable devant celle dissipée par l'unité de communication. Il est néanmoins beaucoup plus judicieux de concevoir des solutions et algorithmes moins gourmands en mémoire et simples en termes de ressources processeur pour une utilisation raisonnable de l'énergie.

2.3.3 Niveau communication

La radio d'un nœud capteur fonctionne généralement suivant quatre modes : émission, réception, passif ou « idle » et veille ou sommeil. Et chacun de ces modes, fonctionne avec différents niveaux d'énergie ; nous les avons énumérés selon l'ordre décroissant de quantité d'énergie dissipée. L'énergie dissipée durant les phases de transmission est proportionnelle à la portée du signal ; c'est-à-dire, plus la puissance du signal est importante, plus l'énergie l'est aussi. Le mode passif ou idle, mode durant lequel la radio reste allumée et qu'il n'y ait aucun bit de données à transmettre ou à recevoir, est aussi une source non négligeable de consommation d'énergie mais est néanmoins moins gourmand que la transmission. Le mode veille est celui avec la plus faible consommation d'énergie parmi les quatre, dans ce cas, la radio est complètement inactive. Outre ces quatre modes, l'unité de communication connaît d'autres formes de consommation d'énergie, les phases de transition entre les différents modes[7].

2.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

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

2.4.1 Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil[8].

- **Etat actif:** la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.
- **Etat sommeil:** la radio est mise hors tension.
- **Etat transmission:** la radio transmet un paquet.
- **Etat réception:** la radio reçoit un paquet.

Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC.

2.4.2 Accès au medium de transmission

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

2.4.2.1 La retransmission

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

2.4.2.2 L'écoute active

L'écoute active (idle listening) du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

2.4.2.3 La sur écoute

Le phénomène de sur écoute (overhearing) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés *figure 2.1*. La sur écoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données. [3]

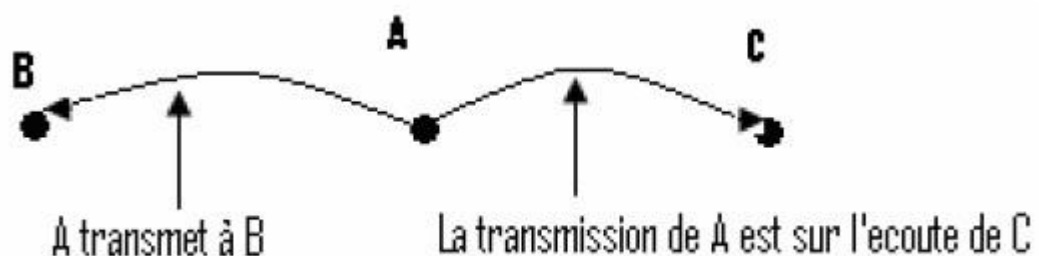


Figure 2.1 La sur écoute dans une transmission

2.4.2.4 Surcharge

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

2.4.2.5 La surémission

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

2.4.2.6 La taille des paquets

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

2.4.2.7 Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $1/d^n$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : $n=2$ dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble)[9].

2.5 Les sources de gaspillage d'énergie

La surconsommation d'énergie est toute énergie consommée au-delà du seuil normal. Celle-ci peut être causée par différents phénomènes qui engendrent le gaspillage d'énergie des nœuds capteurs.

2.5.1 L'écoute passive (idle)

Les nœuds capteurs sortent périodiquement de leur état de sommeil afin d'écouter le trafic dans le réseau. Cette écoute permet de savoir s'il y'a des données à recevoir ou à relayer dans le réseau. Cependant, cette mise en écoute peut être très coûteuse dans le cas de réseau à faible trafic. En effet, le nœud capteur peut écouter le trafic sans pour autant recevoir ou transmettre des données, ce qui va gaspiller inutilement ses réserves d'énergie. De plus, la transition périodique entre le sommeil et l'écoute engendrera une autre source de surconsommation d'énergie, surtout dans le cas où celle-ci n'est pas contrôlée.

2.5.2 Les collisions

À cause de leur environnement de communication sans fil, les réseaux de capteurs sont fortement exposés aux interférences et aux collisions. Ces dernières sont générées lorsque deux ou plusieurs nœuds adjacents transmettent leurs données en même temps. En effet, les collisions sont considérées comme étant la source de gaspillage d'énergie la plus importante, étant donné que celles-ci provoquent la retransmission des paquets en collisions, ce qui est très coûteux en énergie.

2.5.3 La puissance de transmission

La portée des antennes radio est directement liée à la puissance de transmission utilisée. La plupart des nœuds capteurs possèdent des antennes à portée statique dans lesquels la puissance de transmission est fixée précédemment par les concepteurs. Par conséquent, un nœud capteur peut gaspiller pas mal d'énergie en utilisant une grande puissance de transmission afin de communiquer avec un nœud très proche de lui.

2.5.4 Les distances de transmission

Afin d'économiser la consommation d'énergie, il est préférable de réduire les distances de transmission entre les nœuds capteurs. Ainsi, la communication multi sauts est souvent sollicitée dans les réseaux de capteurs sans fil, contrairement à celle basée sur un seul saut dans laquelle la dissipation d'énergie est très élevée.

2.5.5 L'écoute abusive (Overhearing)

Le nœud capteur peut recevoir toutes les données échangées entre ses nœuds voisins, même si ces dernières ne lui sont pas destinées. L'intensité de cette écoute abusive est proportionnelle à la densité du réseau. Ainsi, cela peut engendrer un grand gaspillage d'énergie, vu que la majorité des RCSFs sont déployés à grande échelle.

2.5.6 Le surcoût des paquets de contrôle (Overhead)

L'échange des paquets de contrôle peut être une autre source de gaspillage d'énergie, principalement si le nombre de paquets de contrôle est inutilement élevé.

2.6 Technique de minimisation de la consommation d'énergie

Nous allons présenter une vue globale de différentes techniques utilisées pour minimiser la consommation d'énergie dans les RCSFs (figure 2.2) [4].

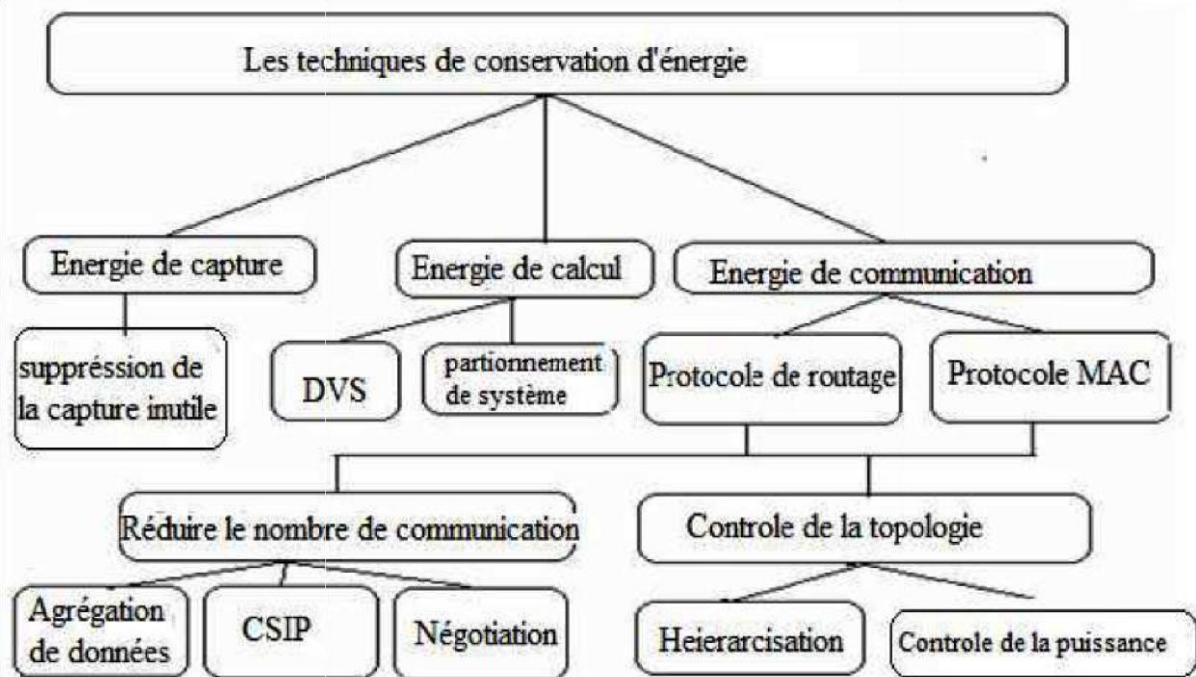


Figure 2.2 Les techniques de conservation d'énergie

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

- a) La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les durées de captures.
- b) L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques:
 - L'approche DVS (Dynamique Voltage Scaling[10]), qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence de microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
 - L'approche de partitionnement de système, qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul[11].
- c) La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : agrégation de données, négociation et CSIP (Collaborative Signal and Information Processing). Cette dernière technique est une

discipline qui combine plusieurs domaines[12] : la communication et le calcul à basse puissance, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont pour but de réduire le nombre d'émission/ réception des messages.

Par contre, le contrôle de la topologie[11]. Permet l'ajustement de la puissance de transmission et le regroupement des nœuds capteurs (hiérarchisation).

- Le contrôle de la puissance de transmission n'a pas seulement un effet sur la durée de vie de la batterie d'un nœud capteur, mais aussi sur la capacité de charge du trafic qui est caractérisée par le nombre de paquets transmis avec succès vers une destination. En outre, il influe sur la connectivité et la gestion de la densité (le nombre de nœuds voisins). Ainsi, il peut conserver l'énergie à deux niveaux : explicitement par l'application de puissances faibles d'émissions et implicitement en réduisant la contention avec d'autres nœuds transmetteurs. Le module de contrôle de la puissance est souvent intégré dans les protocoles soit de la couche réseau soit de la couche MAC[12].
- La hiérarchisation consiste à organiser le réseau en structure à plusieurs niveaux. C'est le cas, par exemple, des algorithmes de groupement (clustering), qui organisent le réseau en groupes (clusters) avec des chefs de groupe (cluster head) et des nœuds membres[9].
- Une autre technique a été proposée dans[13] cette technique profite de la densité élevée des capteurs déployés pour se permettre d'endormir certains d'entre eux, afin que tous les capteurs ne soient pas actifs en même temps.

Une panoplie de protocoles a été proposée dans la littérature. La grande partie de ces protocoles est destinée à la couche réseau et MAC.

Les protocoles de la couche réseau dans les RCSF peuvent être divisés selon la structure du réseau en routage linéaire, routage hiérarchique et routage basé sur la localisation. Dans le routage linéaire, tous les nœuds ont typiquement les mêmes rôles ou fonctionnalités. Cependant, dans le routage hiérarchique, les nœuds joueront différents rôles dans le réseau. Dans le routage basé sur la localisation, les positions des nœuds capteurs sont exploitées pour router les données dans le réseau. En outre, ces protocoles peuvent être classés selon leurs fonctionnements, en techniques de routage multi trajectoires, basées sur les questions, par cohérence, par négociation ou basées sur la qualité de service[14].

De même, il existe plusieurs protocoles de la couche MAC qui sont développés pour les RCSF. Plusieurs classifications de ces protocoles ont été proposées dans la littérature. Les auteurs de [27] classifient ces protocoles MAC en deux classes : les protocoles à accès centralisé et les protocoles à accès aléatoire.

2.7 Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteurs est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière, quant à elle, dépend essentiellement de la consommation d'énergie du nœud. Nous avons présenté dans ce chapitre différentes techniques utilisées pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Parmi ces techniques le routage qui sera présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

3.1 Introduction

3.2 Classification des protocoles de rouage pour les RCSFs

3.3 Exemples des protocoles de routage dans les RCSFs.

3.4 Classification des différents protocoles de routagedans les RCSFs

3.5 Conclusion

3.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil consiste en un ensemble de nœuds capteurs déployés à grande échelle dans un champs de captage pour détecter, recueillir et transmettre les données, concernant un phénomène observé, vers le nœud puits via les liens sans fil. Cependant, suivant le nombre de nœuds du réseau et l'étendu du champ de captage, certains nœuds ne pourront pas transmettre directement leurs messages au nœud collecteur. Ainsi, la collaboration entre les nœuds pour garantir cette transmission est une exigence. De cette manière, les messages sont propagés par les nœuds intermédiaires en établissant les chemins multi-sauts entre la source lointaine et le puits. Ce processus d'acheminement des messages d'un nœud source du réseau vers un nœud destinataire s'appelle le routage.

En tenant compte des capacités réduites des nœuds capteurs (calcul, énergie, mémoire), la communication avec le puits devrait se faire sans protocole de routage. Dans ce cas, la solution la plus simple serait, pour chaque nœud capteur, d'envoyer ses messages par diffusions jusqu'à ce qu'ils arrivent au collecteur. Cependant cette simplicité provoque des désavantages significatifs tels que l'implosion et le chevauchement des messages. Une implosion est détectée parce que les nœuds reçoivent des copies multiples du même message (problème de redondance de données).

De plus, les nœuds ne tiennent pas compte de leurs ressources pour limiter leurs opérations (émission, calcul). Ainsi, pour qu'un réseau de capteur soit efficace, la mise en place d'un algorithme de routage devient inévitable. Néanmoins, vu les contraintes imposées par ces réseaux, la mise en place d'un protocole de routage n'est pas une tâche facile.

Plusieurs travaux de recherche dans le domaine des RCSFs ont été effectués récemment et ont abouti à une multitude protocoles de routage destinés à ces réseaux.

Dans ce chapitre, nous faisons une étude bibliographique sur les protocoles de routage proposés pour les RCSFs. Vu leur multiplicité, il nous semble important de commencer par leur classification qui les groupe suivant un certain nombre de critères.

3.2 Classification des protocoles de routage pour les RCSFs

Récemment, les protocoles de routage pour les RCSFs ont été largement étudiés. Les protocoles proposés présentent les points communs et donc peuvent être classifiés suivant un certain nombre de critères. La figure 3.1 ci-dessous résume une classification qui se base sur quatre critères : la topologie (structure) du réseau, mode d'établissement des chemins, les paradigmes de communication et selon le mode de fonctionnement du protocole.

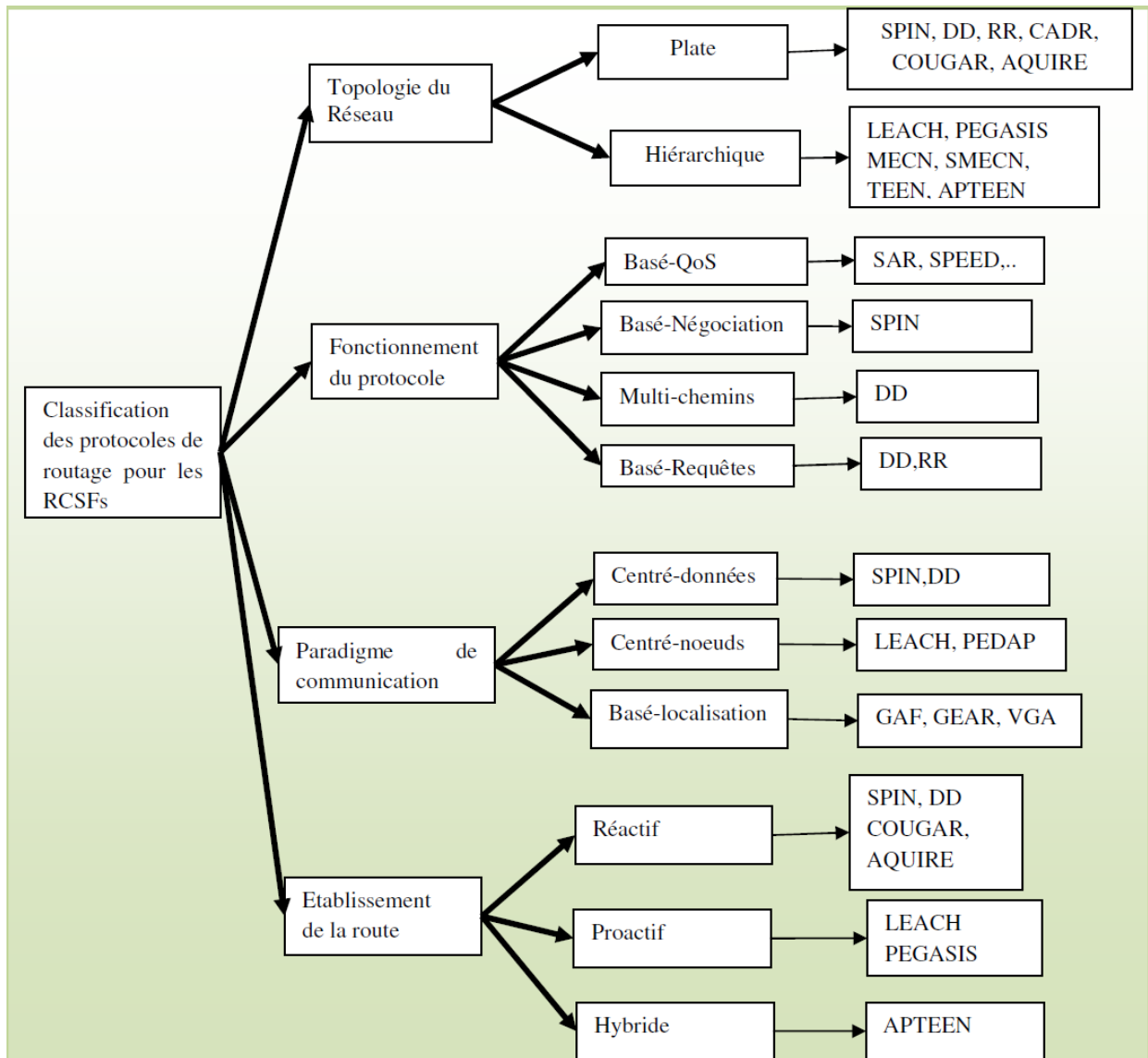


Figure 3.1: Classification des protocoles de routage pour les Réseaux de capteurs sans fil

3.2.1 Selon la topologie (structure) du réseau

La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau. Globalement, il existe deux topologies dans les RCSFs[15] : la topologie plate et la topologie hiérarchique.

a) Topologie plate

Dans une topologie plate, tous les nœuds capteurs possèdent le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par : la simplicité des protocoles de routage, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, Les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routage. De plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité dû au fonctionnement identique des nœuds et d'une manière distribuée nécessitant ainsi un grand nombre de messages de contrôle. La figure suivante illustre l'organisation des capteurs dans une topologie plate.

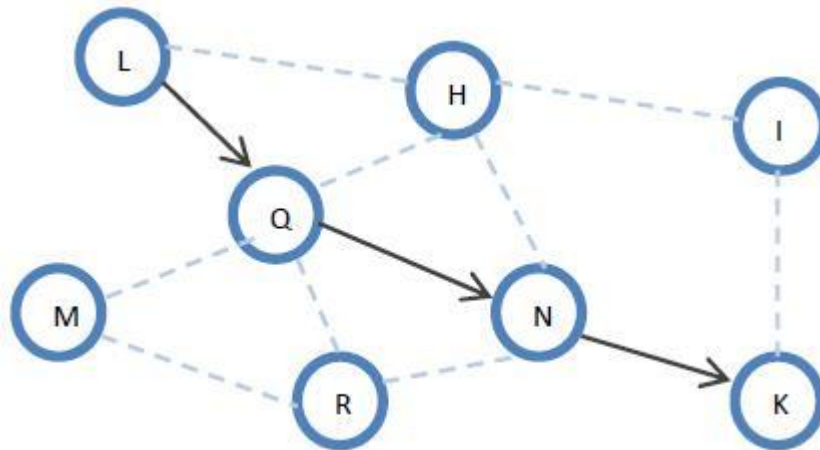


Figure 3.2 Topologie plate

b) Topologie hiérarchique

Dans une topologie hiérarchique, les nœuds ont des différents rôles. En effet, certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Une des méthodes les plus utilisées dans cette topologie est le Clustering. Il consiste en un partitionnement du réseau en groupes appelés Clusters. Un cluster est constitué d'un chef (Cluster Head) et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs du chef ou pas.

Cette topologie présente beaucoup d'avantages tels que l'agrégation des données collectées ainsi qu'une grande scalabilité. Son inconvénient majeur est la surcharge des Cluster Heads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, Cluster Heads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus

de capacités de traitement ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes. Un exemple de cette topologie est donné dans la figure 3.3 ci-dessous. Pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

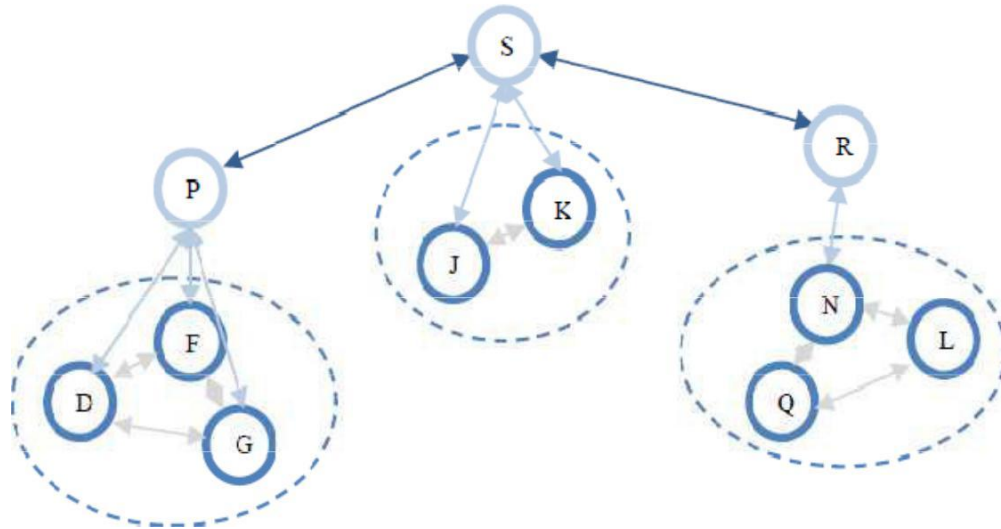


Figure 3.3 Routage hiérarchique

3.2.2 Selon les paradigmes de communication

Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans les RCSFs, il existe trois paradigmes de communication[16]: centré-nœuds, centré-données et basé sur la localisation.

a) Centré-nœuds (Node-centric)

Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants (comme l'adresse IP). Les réseaux ad hoc utilisent ce genre de paradigme, qui s'intègre bien avec l'utilisation de ce type d'environnement. Cependant, pour les réseaux de capteurs, un routage basé sur une identification individuelle des nœuds ne reflète pas l'usage réel du réseau. Pour cela, un autre paradigme a été introduit : Data-centric. Néanmoins, le paradigme node-centric n'est pas à écarter totalement, car certaines applications nécessitent une interrogation individuelle des capteurs.

b) Centré-données (Data-centric)

Ce paradigme suppose qu'il est difficile d'avoir des identifiants comme les adresses MAC ou IP pour pouvoir communiquer entre les nœuds capteurs[7]. Ainsi, le routage ne se fait pas en fonction d'une adresse de destination, mais suivant les données disponibles au niveau des capteurs. Ces données seront propagées de proche en proche pour arriver au nœud puits.

c) Basé-localisation (location-based)

Dans cette approche, les décisions de routage sont établies selon la position des nœuds. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base de la puissance du signal arrivé. Un tel type de routage nécessite que les nœuds aient connaissance de leurs positions géographiques. Par conséquent, ce type de mécanismes nécessite un déploiement d'une solution de positionnement, dont le degré de précision requis dépend de l'application ciblée. L'utilisation du GPS reste trop coûteuse pour un RCSF. Néanmoins, d'autres méthodes de localisation et de positionnement des capteurs ont été développées comme par exemple la triangulation[16].

3.2.3 Selon le mode de fonctionnement du protocole

Le mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être classifiés en quatre catégories: routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Quality of Service "QoS" based routing), routage basé sur les requêtes (query-based routing), routage multi-chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negotiation based routing)[15].

a) Routage basé sur les multi-chemins

Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La fiabilité d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Pour cette raison, certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants, c.-à-d. : ils ne partagent qu'un nombre réduit (voire nul) de nœuds. Malgré leur grande tolérance aux pannes, ces protocoles requièrent plus de ressources énergétiques et plus de messages de contrôle.

b) Routage basé sur les requêtes

Dans ce type de routage, le puits génère des requêtes afin d'interroger les capteurs. Ces requêtes sont exprimées soit par un schéma valeur-attribut ou bien en utilisant un langage spécifique (par exemple SQL : Structured Query Language). Les nœuds qui détiennent les données requises doivent les envoyer au nœud demandeur à travers le chemin inverse de la requête. Les requêtes émises par le puits peuvent aussi être ciblées sur des régions spécifiques du réseau.

c) Routage basé sur la négociation

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient

entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent déjà de la donnée à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

d) Routage basé sur la qualité de service

Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, retard, énergie, largeur de bande passante, etc. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications de surveillance (centrales nucléaires, applications militaires, etc...).

3.2.4 Selon le mode l'établissement des chemins

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage, nous distinguons trois catégories de protocoles de routage : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides[17].

a) Les protocoles proactifs

Utilisent l'échange régulier de messages de contrôle pour maintenir au niveau de chaque nœud des tables de routage (qui associent à chaque destination ou groupe de destinations un voisin direct par lequel les paquets doivent être relayés) vers toute destination atteignable depuis celui-ci. Ces tables sont maintenues mêmes quand les routes ne sont pas utilisées.

Cette approche permet de disposer d'une route vers chaque destination immédiatement au moment où un paquet doit être envoyé. Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Et par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité, et n'enclencher leur dispositif de capture qu'à des instants particuliers.

b) Les protocoles réactifs

Dits aussi les protocoles de routage à la demande, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsqu'un nœud a besoin d'une route, une procédure de découverte globale est lancée. Cette procédure s'achève par la découverte de la route ou lorsque toutes les permutations de routes possibles ont été examinées. La route trouvée est maintenue par une procédure de maintenance de routes jusqu'à ce que la destination soit inaccessible à partir du nœud source ou que le nœud source n'aura plus besoin de cette route.

c) Protocoles hybrides

Ces protocoles combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux sauts), ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone du voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

Dans le reste de cette section, nous présentons une vue d'ensemble détaillée des principaux protocoles de routage dans les RCSFs appartenant à ces classes.

3.3 Exemples des protocoles de routage dans les RCSFs

3.3.1 Propagation et discussion (flooding and gossiping)

Pour le flooding, chaque capteur recevant un paquet de données le renvoie à tous ses voisins et ce processus continue jusqu'à ce que le paquet arrive à la destination ou le nombre maximum de sauts pour le paquet (TTL) est atteint. Ce protocole présente un ensemble d'inconvénients dont :

- **Implosion:** le même message est dupliqué plusieurs fois ; chaque nœud reçoit autant de fois la même donnée que le nombre de ses voisins ;
- **Chevauchement:** si deux nœuds observent le phénomène dans la même région, la même information sera envoyée deux fois (redondance des données);
- Il utilise aveuglement les ressources disponibles sans tenir en compte de leur quantité.

D'autre part, le gossiping est une version légèrement améliorée du flooding où le nœud récepteur envoie un paquet à un sous ensemble de ses voisins choisis aléatoirement. L'implosion n'est plus un inconvénient pour ce protocole. Cependant, l'envoi d'un message à tous les nœuds (un à un) demande plus de temps;

3.3.2 Directed Diffusion (DD)

Directed Diffusion [18,19] est un protocole de routage de catégorie Data-centric, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. Le principe de fonctionnement du protocole DD est le suivant :

Le nœud « Sink » commence à envoyer, vers tous les nœuds, un message **Interest** pour démarrer une application bien déterminée. Ce paquet sera acquitté par un autre appelé **gradient**. Un gradient est un lien de réponse de la part du voisin recevant l'intérêt. En utilisant les intérêts et les gradients, plusieurs chemins peuvent être établis entre le « Sink » et la source. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue un nouveau ou un alternatif doit être identifié. La figure 3.4 suivante illustre les phases de fonctionnement de ce protocole.

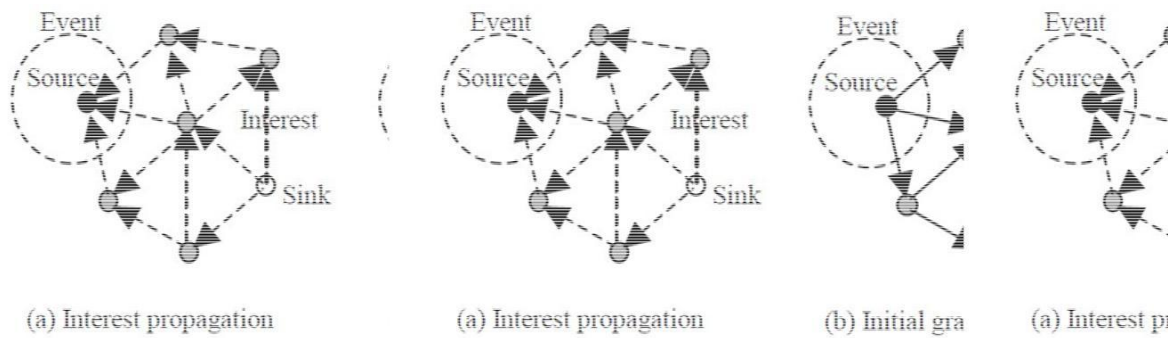


Figure 3.4 Les phases de communication du protocole Directed Diffusion

3.3.3 Rumor Routing (RR)

Rumor routing[20] est une variante du protocole Directed Diffusion. Généralement Directed Diffusion utilise une forme d'inondation pour la propagation des requêtes (intérêts).

Cependant, dans certains cas il y a seulement une petite quantité de données demandée des nœuds et ainsi l'utilisation d'inondation est inutile. Une approche alternative est d'inonder les événements si le nombre d'événements est petit et le nombre des requêtes est grand. Le protocole Rumor Routing essaie de trouver un compromis entre l'inondation des intérêts et la propagation des données.

L'idée est de router des requêtes aux nœuds qui ont observé un événement particulier plutôt qu'inonder le réseau entier pour récupérer des renseignements sur les événements se produisant. Pour inonder l'événement à travers le réseau, l'algorithme Rumor Routing utilise le concept d'agent.

Un agent est un paquet avec une grande portée (TTL) qui traverse le réseau et informe de nœud en nœud en informant ces nœuds des événements qu'il a rencontrés durant toute cette traversée. Quand un nœud détecte un événement, il l'ajoute à sa table locale et génère un paquet agent. Ce paquet parcourt le réseau afin de propager des informations sur les événements locaux aux nœuds distants. Quand un nœud génère une requête pour un événement, les nœuds qui connaissent l'itinéraire, peuvent répondre en se référant à la table d'événement.

3.3.4 SensorProtocols for Information via Negotiation: (SPIN)

SPIN [21] est parmi les premiers protocoles de routage Data-centric basé sur la négociation. SPIN est basé sur l'idée que les nœuds capteurs opèrent plus efficacement et conservent l'énergie en envoyant des données qui décrivent les données des capteurs au lieu d'envoyer les données entières, à moins que les données entières ne soient explicitement demandées. Cela permet de

pallier au problème d'inondation. Pour cela, SPIN utilise trois types de messages : ADV (ADVERTISE), REQ (REQUEST) et DATA.

Avant d'envoyer une donnée entière (message DATA), un nœud diffuse un message ADV qui contient la description, c.-à-d. méta-données, de la donnée en question. Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin (émetteur d'ADV). En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA. Les nœuds voisins répètent ainsi cette opération, comme le montre la figure 3.5. Comme résultat, les nœuds qui sont intéressés par la donnée en auront une copie.

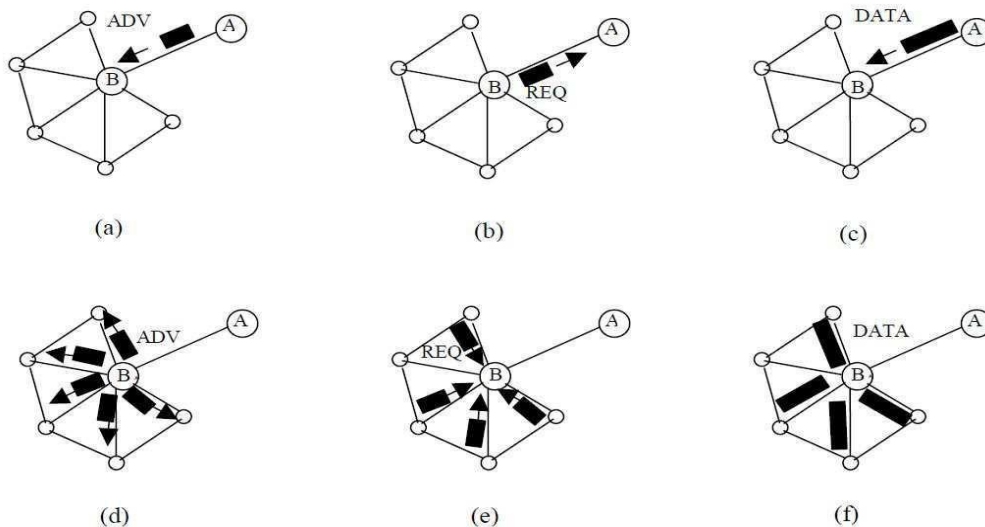


Figure 3.5: Le protocole SPIN

Sur cette figure, le nœud A commence par aviser ses données au nœud B (a). Le nœud B répond en envoyant la requête au nœud B (b). Après avoir reçu la donnée demandée (c), le nœud B avise cette donnée à ses voisins (d), qui rendent à tour de rôle des requêtes à B (e-f).

Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l'énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud. En effet, les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie d'une manière continue. Lorsque le nœud s'aperçoit que son niveau d'énergie a atteint un certain seuil, il change son mode de fonctionnement, et ne répond à aucun message ADV.

Notons que le format des méta-données utilisé dans SPIN n'est pas standardisé (dépend de l'application)[22].

3.3.5 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

LEACH [23,24] est le premier et le plus populaire des algorithmes de routage hiérarchiques avec une efficacité énergétique, qui a été proposé pour les RCSFs[15]. LEACH emploie la technique de Clustering qui divise le réseau en deux niveaux: les Clusterheads (CHs) et les nœuds membres. Le protocole se déroule en rounds. Chaque round se compose de deux phases: construction et communication. La durée de la phase de communication est plus longue que celle de la phase de construction afin de minimiser l'overhead.

➤ Phase de construction

Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs (CHs) et en établissant la politique d'accès au média au sein de chaque groupe. Durant cette phase, chaque nœud n choisit un nombre aléatoire compris entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à un seuil $T(n)$, le nœud devient clusterhead. $T(n)$ est défini comme suit:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad \text{Equation 3.1}$$

Avec :

P: pourcentage des nœuds désirant devenir clusterhead.

r: numéro du round courant.

G: Ensemble de nœuds n'ayant pas été élus clusterheads durant les $1/P$ dernières périodes précédents. Par la suite, chaque nœud qui s'est élu clusterhead émet un message de notification à tous ces voisins. Les nœuds qui récoltent les messages de notification, décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu : le clusterhead ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision.

➤ Phase de communication

Pendant cette phase, les nœuds capteurs peuvent commencer à envoyer leurs données captées au clusterhead pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Le clusterhead agrège les données reçues avant de les transmettre au collecteur (puits).

Cette communication, entre un clusterhead et le collecteur, se fait d'une manière directe¹. Après la phase de communication, qui dure un certain temps, la phase de construction recommence.

¹LEACH suppose que les chefs de clusters sont capables d'atteindre la station de base à un seul saut.

3.3.6 Cougar[25]

Le réseau est vu comme une base de données distribuée où quelques nœuds contenant les renseignements sont temporairement inaccessibles. Les données produites par le réseau de capteurs sont modélisées comme une table relationnelle. Dans cette table, chacun des attributs représente soit des informations sur le nœud capteur ou bien des données produites par ce nœud. Pour pouvoir interroger les nœuds du réseau, Cougar fournit une interface semblable à SQL (StructuredQueryLanguage) étendue, au niveau du puits. Cette interface permet au puits de générer des requêtes pour interroger un nœud spécial du réseau, appelé leader (chef). L'approche Cougar fournit une agrégation partielle au niveau des nœuds. Chaque nœud maintient une liste d'attente contenant les nœuds fils qui doivent lui envoyer les paquets. Le nœud n'émet le paquet agrégé au prochain saut que s'il a reçu les paquets de tous les nœuds de la liste d'attente. Cependant, un nœud peut devenir inaccessible à cause du mouvement ou d'un problème de batterie. Pour cela, Cougar utilise un timer afin d'éviter une attente indéfinie.

3.3.7 ACQUIRE (Active QueryForwarding in Sensor Networks)[26]

Cet algorithme considère aussi un RCSF comme une base de données distribuée. Dans ce plan, un nœud injecte un paquet de requête actif dans le réseau. Le voisin qui découvre que le paquet contient des informations obsolètes, émet un message de mise à jour au nœud source du paquet. Alors, le nœud choisit au hasard un voisin pour propager la requête. Comme la requête active progresse à travers le réseau, elle est progressivement résolue en plus petits composants de jusqu'à ce qu'elle soit complètement résolue. Alors, la requête est retournée au nœud source comme une réponse complète.

3.3.8 Geographic and EnergyAwareRouting (GEAR) [27]:

Le protocole GEAR découpe le réseau en régions. Chaque nœud connaît le coût pour atteindre chaque région. L'acheminement des paquets suit les étapes suivantes:

- Acheminer le paquet jusqu'à la région, en envoyant le paquet au nœud le plus proche de la région parmi ses voisins et ayant le niveau d'énergie résiduelle le plus élevé (fonction de distance et d'énergie),
- Acheminer le paquet dans la région de destination par une sorte de diffusion si le nombre de nœud n'est pas élevé, sinon la région est découpée en sous-région et le paquet est transmis individuellement à chaque sous-région.

Chaque paquet contient la région destination. Chaque nœud connaît sa position, son énergie résiduelle, la position et l'énergie résiduelle de ses voisins (à la demande). Un lien existe entre 2 nœuds quand ils sont à portée et leur niveau d'énergie leur permet d'effectuer l'envoi.

3.3.9 Sequential Assignment Routing (SAR)

SAR [28] est l'un des premiers protocoles de routage pour les RCSFs qui introduit la notion de qualité de service (QoS) dans les décisions de routage [29]. SAR est une approche multi-chemins qui s'efforce à réaliser l'efficacité énergétique et la tolérance aux pannes. Pour cela, SAR crée des arbres en prenant en compte les trois facteurs : métriques QoS, la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant ces arbres, des routes multiples du sink aux capteurs sont formées. Une ou plusieurs routes peuvent alors être empruntées. Pour assurer la tolérance aux pannes, SAR recalcule périodiquement les routes à choisir en cas de défaillance d'un nœud ou de changement de topologie [30,31].

3.3.10 SPEED [32].

SPEED est un autre protocole de routage basé sur la QoS qui garantit le temps réel et le routage bout en bout. Une métrique supplémentaire par rapport à GEAR : le délai. En se basant sur une table de positions, SPEED estime le délai sur chaque saut en calculant le délai d'aller-retour (en retranchant le temps de traitement côté récepteur). Autrement dit, SPEED assure une vitesse de livraison des paquets constante, qu'on note **Set speed**. Ceci permet de garantir des délais de livraison de bout en bout acceptables. Après avoir déterminé le délai, le prochain saut est choisi parmi les voisins qui sont plus proches de la destination.

3.3.11 TEEN et APTEEN :

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) [33] est un protocole hiérarchique conçu pour être sensible aux changements imprévus des attributs détectés tels que la température. L'architecture du réseau est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds les plus proches forment des clusters. Après la construction des clusters, le clusterhead diffuse deux seuils aux nœuds. Qui sont la valeur minimale d'un attribut pour pouvoir être transmis et le degré minimal du changement de cet attribut.

APTEEN (Adaptive Periodic TEEN) [34] est une extension du TEEN basée sur la capture périodique des données et la réaction aux événements temps-réel. Quand la station de base forme les clusters, les cluster-heads diffusent les attributs, les seuils et le plan de transmission à tous les nœuds et effectuent également l'agrégation des données afin d'économiser l'énergie.

3.4 Classification des différents protocoles de routage dans les RCSFs

Nous présentons ici la classification des protocoles de routage dans les RCSFs discutés dans la section précédente. La table suivante montre comment ces protocoles s'adaptent aux différentes catégories.

	Structure du réseau	Etablissement de la route	Initiateur de communication	QoS	Flux de données dans le réseau	Multi-chemins	Basé sur la négociation
1. Flooding et Gossiping	A plat	réactif	source	non	non	non	non
2. Directed Diffusion	A plat	hybrid	destination	oui	non	oui	oui
3. Rumor Routing	A plat	réactif	source	non	non	non	non
4. SPIN	A plat	réactif	source	non	non	oui	oui
5. LEACH	hiérarchique	proactif	source	non	non	non	non
6. Gougar	A plat	réactif	destination	non	non	non	non
7. ACQUIRE	A plat	réactif	destination	non	non	non	non
8. GEAR	LG	Proactif	source	non	non	non	non
9. TEEN	hiérarchique	hybrid	destination	oui	non	non	non
10. SAR	LG	Proactif	source	non	non	non	non
11. SPEED	hiérarchique	hybrid	destination	oui	non	non	non

Tableau 3.2 Classification des différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs

3.5 Conclusion

Le routage dans les RCSFs forme un axe de recherche intéressant, avec un ensemble limité, mais en pleine croissance de résultats des recherches. Cette croissance fortement liée à deux facteurs:

- Les capteurs sont des véritables systèmes embarqués et donc sont conçus pour les applications spécifiques,
- L'expansion du champ de domaine d'application des RCSFs.

Les protocoles de routage proposés pour les RCSFs sont donc nombreux, mais ils ont tous un objectif commun: Assurer l'acheminement des données collectées par les nœuds capteurs tout en

essayant d'étendre la durée du réseau. Cela nécessite la prise en compte des caractéristiques des RCSFs et des exigences des applications pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

Dans ce chapitre, nous avons identifié et classifié quelques protocoles de routage pour les RCSFs proposés dans la littérature. De façon générale, ces protocoles sont classifiés selon la structure du réseau, le fonctionnement des protocoles, l'établissement de la route, ou les paradigmes de communication.

Chapitre 4

Contribution & Implémentation

Sommaire

4.1 Introduction

4.2 Langage utilisé

4.3 Le modèle du système

4.4 Description de notre approche

4.5 Organigrammes de notre approche

4.6 Implémentation

4.7 Conclusion

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre approche proposée. Cette approche basée sur la structure d'arbre pour envoyer les données des nœuds à la station de base. Elle utilise le principe de formation des niveaux et des zones où la zone d'intérêt est divisée en plusieurs zones. Le mode de transmission des données depuis les nœuds jusqu'à la station de base se fait par multi-saut entre les différents niveaux. Nous signalons que le protocole proposé est centralisé car la construction de chemin de données entre les niveaux est faite par la station de base.

4.2 Langage utilisé

Nous avons développé notre application de simulation à l'aide du langage Borland C++ Builder2010 version 14.0 qui utilise l'environnement Windows. Borland C++ builder est un environnement de programmation visuel orienté objet permettant le développement d'applications en vue de leur déploiement sous Windows ou Linux. La programmation orientée objet (POO) répond à ces besoins. Elle fournit les techniques permettant de traiter des applications très complexes, exploite des composants logiciels réutilisables et associe les données aux tâches qui les manipulent. La caractéristique essentielle de la programmation orientée objet est de modéliser des "objets" (c'est-à-dire des concepts) plutôt que des "données". Ces objets peuvent être des éléments graphiques affichables, comme des boutons ou des zones de liste, ou des objets réels, comme des capteurs. Les objets possèdent des caractéristiques, également appelées propriétés ou attributs, comme identificateur, énergie. Le rôle de la programmation orientée objet est de représenter ces objets dans le langage de programmation. Borland C++ builder repose sur un ensemble très complet de composants visuels prêts à l'emploi. La quasi-totalité des contrôles de Windows (boutons, boîtes de saisies, listes déroulantes, menus et autres barres d'outils) y sont représentés. Les caractéristiques du C++ sont:

- En font un langage idéal pour certains types de projets.
- Il est incontournable dans la réalisation des grands programmes.
- Il dispose d'un grand nombre de fonctionnalités (par exemple, un générateur pseudo aléatoire).
- Son contrôle d'erreurs est accru, basé sur un typage très fort, qui permet de signaler un grand nombre d'erreurs à la compilation.
- Il permet aussi de créer des exécutables et des DLL.
- Il est à la fois facile à utiliser et très efficace.

Hardware	Caractéristiques
Processeur	Intel(R) Core(TM) i3CPU 380M@ 2.53GHz, 2.53GHz.
Mémoire (RAM)	4.00 Go.
Système d'exploitation	Microsoft Windows7 Professional 32 bits.

Tableau 4.1: Caractéristiques matérielles.

4.3 Le modèle du système

4.3.1 Le modèle réseau

- Les nœuds sont distribués dans un espace de 2-dimensions.
- Les nœuds capteurs sont fixes (statiques) et homogènes dans la capacité de traitement et de communication.
- L'énergie initiale est uniforme pour tous les nœuds et il est incapable de les rechargés, et la SB n'est pas limitée en termes d'énergie, de mémoire et de puissance de calcul.
- L'espace (Zone d'intérêt) est divisé en quatre zones égaux.
- La position de la station de base est au milieu.
- Chaque zone est divisée à son tour en quatre sub_zone égaux.
- Chaque zone envoie ses données à la SB (en parallèle).
- Chaque nœud communique seulement avec les nœuds de la même zone.
- Les nœuds dans chaque zone sont distribués en trois niveaux (structure d'arbre).
- Les nœuds de niveau 1 envoient ses données aux nœuds de niveau 2, ces derniers envoient leurs données aux nœuds de niveau 3 pour les envoyer à la SB.

4.3.2 Le modèle de dissipation de l'énergie

Nous utilisons un modèle simple de radio de commande. Dans ce modèle, une radio dissipe 50 nJ/bit pour exécuter l'émetteur ou le récepteur et $E_{mp} = 0.0013$ pJ/bit/m² pour l'amplificateur de l'émetteur. Lorsque la distance entre deux nœuds ou la station de base est supérieure à la distance, le modèle (E_{mp}) de propagation par trajets multiples (multipath fading channel model) est utilisé, et dans le cas inférieur, le modèle (E_{fs}) de l'espace libre de canal (free space channel model) est utilisé. Les radios ont la puissance de contrôle et peuvent dépenser la minimum énergie nécessaire pour atteindre les destinataires prévus. Les radios peuvent être tournées off (mode sleep) pour éviter de recevoir les transmissions involontaires.

Les équations utilisées pour calculer les coûts de transmission et les coûts de réception pour un message de L bits et une distance d sont indiqués ci-dessous:

- Pour transmettre un message de L bits sur une distance de d mètres, l'émetteur consomme:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{mp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad \text{Équation 4.1}$$

- E_{elec} : L'énergie suffisante pour transmettre ou recevoir un seul bit.

- E_{fs} : Facteur de l'amplification correspond au modèle « free space channel ».

- E_{mp} : Facteur de l'amplification correspond au modèle « multipath fading channel ».

- E_{elec} : L'énergie d'agrégation de donnée.

- L : La taille d'un message.

- d_0 : La distance limite pour laquelle les facteurs d'amplification changent de valeur.

- d : La distance entre l'émetteur et le récepteur.

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

$$E_{TX}(L) = L * E_{elec}$$

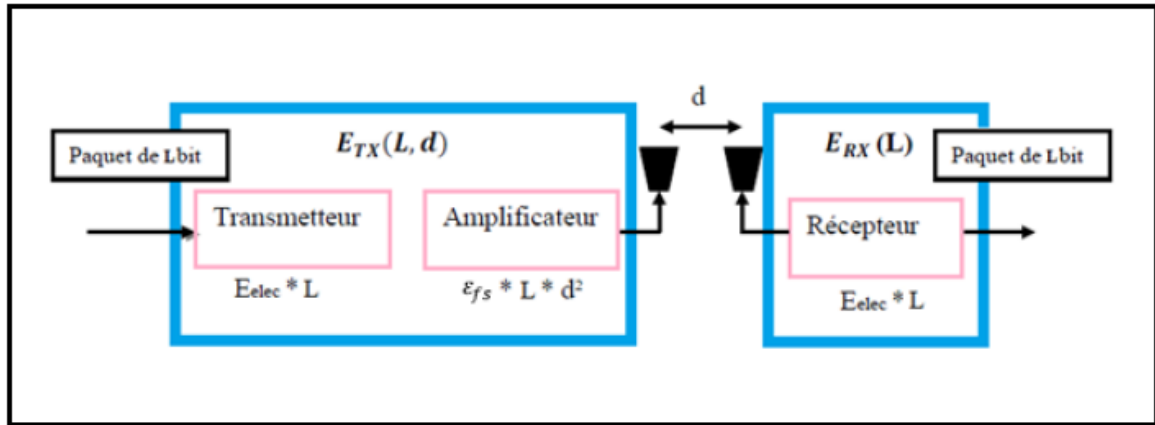


Figure 4.1: Le modèle de dissipation de l'énergie.

4.4 Description de notre approche

L'objectif de l'approche proposée est de conserver l'énergie résiduelle des nœuds qui sont proches entre eux dont un seul nœud envoie la grandeur physique détectée dans un petit espace (la température par exemple) en utilisant la structure d'arbre comme protocole de routage pour réduire la distance de transmission des données des nœuds à station de base. Le protocole proposé permet de réduire le nombre de nœuds qui communiquent directement avec la station de base. La communication se fait entre les nœuds par la formation des chaînes entre les nœuds fils et les nœuds père (niveau n et niveau $n+1$). Pour cela la zone d'intérêt est divisée en quatre zones, et chaque zone à son tour est divisée en quatre sub_zones avec des niveaux différents (trois niveaux) pour obtenir des espaces plus petits et donc des nœuds plus proches entre eux.

Les capteurs sont distribués aléatoirement avec trois scénarios:

- **Le premier scénario:** On prend en considération le nombre des capteurs dans chaque niveau lors de la distribution des capteurs, dont le nombre des capteurs déployés dans le niveau $n+1$ supérieur au nombre des capteurs déployés dans le niveau n .
- **Le deuxième scénario:** La distribution des capteurs est faite d'une manière équitable entre les quatre zones, mais aléatoirement dans les sub_zones.

- **Le troisième scénario:** La distribution des capteurs est faite aléatoirement dans les quatre zones.

Sub_zone1(Niveau1)	Sub_zone2(Niveau2)	Sub_zone1(Niveau2)	Sub_zone2(Niveau1)
Sub_zone3(Niveau2)	Sub_zone4(Niveau3)	Sub_zone3(Niveau3)	Sub_zone4(Niveau2)
Sub_zone1(Niveau2)	Sub_zone2(Niveau3)	Sub_zone1(Niveau3)	Sub_zone2(Niveau2)
Sub_zone3(Niveau1)	Sub_zone4(Niveau2)	Sub_zone3(Niveau2)	Sub_zone4(Niveau1)

Figure 4.2: Les niveaux de la zone de simulation.

La transmission des données entre les nœuds et la station de base est identique pour les trois scénarios précédents sont faites parallèlement dans les quatre zones en suivant les procédures suivantes:

- On sélectionne un seul nœud qui a un niveau d'énergie plus élevé parmi les nœuds de même sub_zones, car ils sont proches entre eux et donc ils ont presque la même valeur de la grandeur physique détectée (la température);
- Le nœud de niveau 1 sélectionné choisie son père parmi les nœuds de niveau 2 le plus proche.
- Le nœud de niveau 2 sélectionné comme père de nœud de niveau 1 agrège ses données avec les données reçues.
- Les nœuds de niveau 2 sélectionnés envoient leurs données à leur père (nœud sélectionné dans le niveau 3).
- Ce dernier envoie directement les données détectées et agrégées à la station de base.
- Les procédures précédentes sont répétées jusqu'à l'épuisement d'énergie.

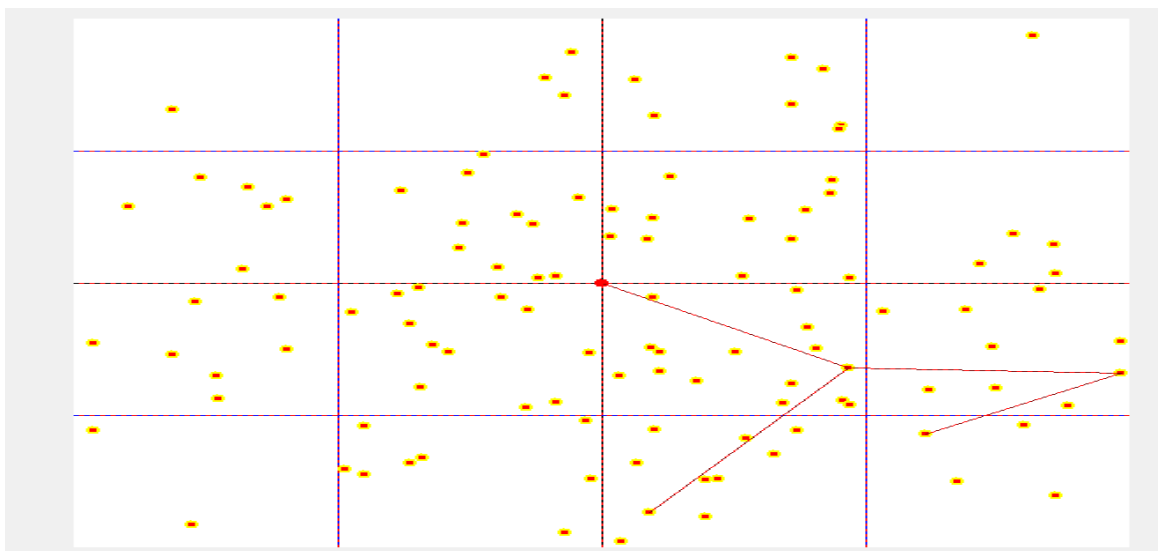


Figure 4.3: Architecture de protocole proposé.

4.5 Organigrammes notre approche

4.5.1 La phase d'initialisation (la phase de déploiement)

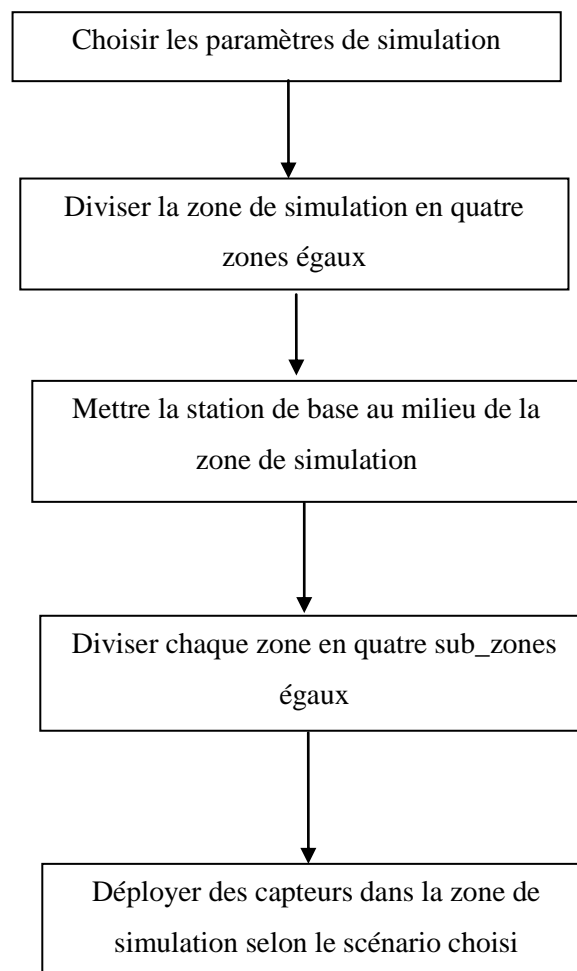


Figure 4.4: Organigramme de la phase d'initialisation (déploiement)

4.5.2 La phase de transmission des données (construction d'arbre)

- Sélectionner un nœud qui a un niveau d'énergie plus élevé parmi les nœuds de même sub_zones,
- Le nœud de N 1 sélectionné choisie son père parmi les nœuds de N 2 le plus proche.
- Le nœud de N 2 sélectionné comme père de nœud de N 1 agrège ses données avec les données reçues.
- Les nœuds de N 2 sélectionnés envoient leurs données à leur père
- Le nœud de N3 envoie directement les données détectées et agrégées à la SB.

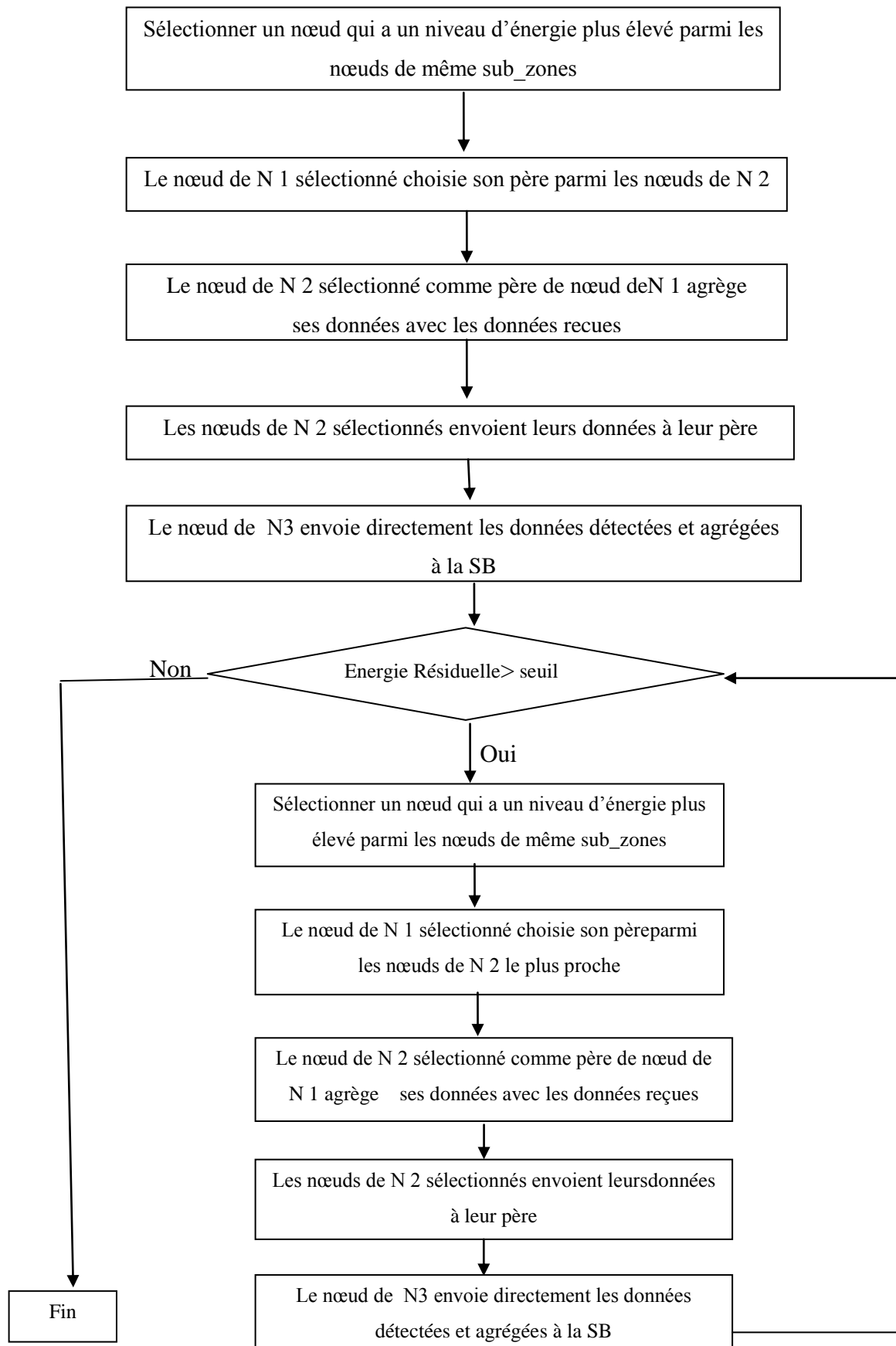


Figure 4.5: Organigramme de la phase de transmission des données (construction d'arbre)

4.6 Implémentation

Dans ce qui suit nous allons décrire l'interface utilisée pour la simulation du protocole Arb-Corr et ainsi que l'analyse des résultats de la simulation obtenues par les trois scénarios.

4.6.1 Interface du simulateur

"Simulateur Arb-Corr" se constitue de quatre parties principales: partie de paramètres de simulation à gauche, partie de zone de simulation au milieu, la partie de résultats de simulation à droite et la partie d'affichage des graphes au bas.

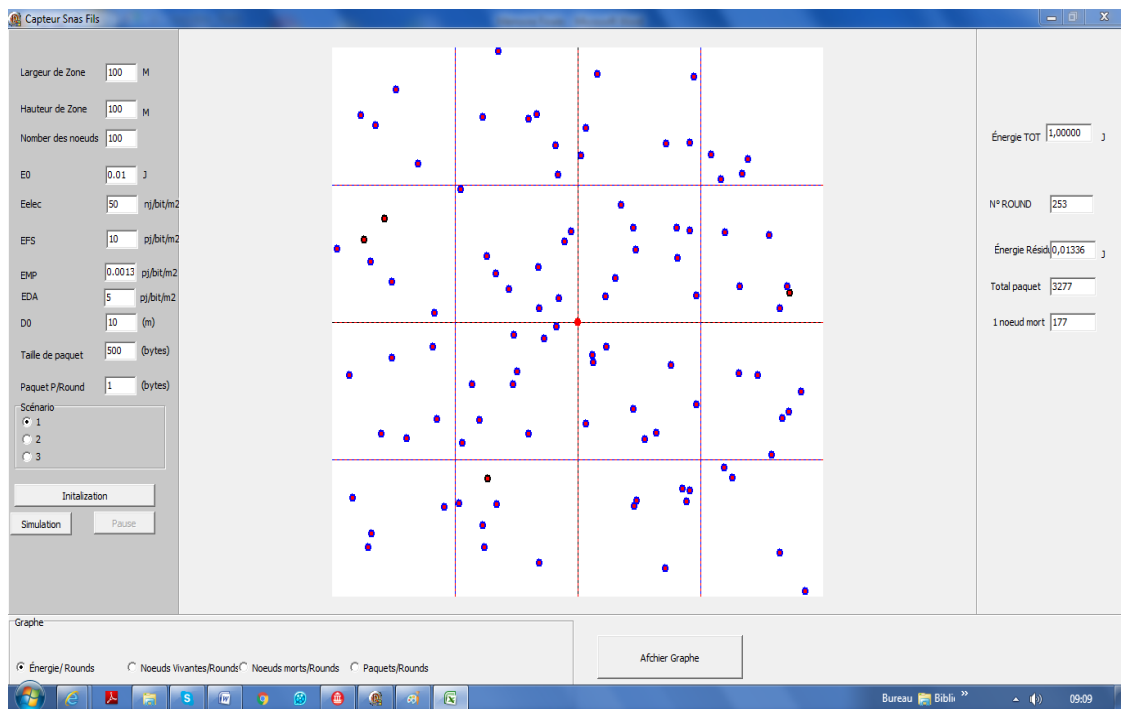


Figure 4.6 : Interface du simulateur Arb-Corr.

a) Partie de paramètres de simulation

Pour simuler le protocole Arb-Corr en utilisant l'interface "Simulateur Arb-Corr", on doit saisir tous les paramètres de simulation. D'abord, on spécifie deux paramètres importants pour n'importe quelle simulation d'un protocole, qui sont les dimensions de la zone de simulation. Après, on entre le nombre des nœuds à distribuer dans la zone, les différentes énergies consommées (l'énergie initiale E_0 , E_{elec} , E_{fs} , E_{mp} , E_{da}), la taille de paquet et le nombre de paquets à transmettre par un seul round. Enfin, on clique sur le bouton "Simulation" pour lancer la simulation après le choix de scénario. Comme on peut utiliser le bouton "Pause" pour pauser ou reprendre la simulation.

Largeur de Zone	<input type="text" value="100"/>	M
Hauteur de Zone	<input type="text" value="100"/>	M
Number des noeuds	<input type="text" value="100"/>	
E0	<input type="text" value="0.01"/>	J
Eelec	<input type="text" value="50"/>	nj/bit/m ²
EFS	<input type="text" value="10"/>	pj/bit/m ²
EMP	<input type="text" value="0.0013"/>	pj/bit/m ²
EDA	<input type="text" value="5"/>	pj/bit/m ²
D0	<input type="text" value="10"/>	(m)
Taille de paquet	<input type="text" value="500"/>	(bytes)
Paquet P/Round	<input type="text" value="1"/>	(bytes)
Scénario		
	<input checked="" type="radio"/>	1
	<input type="radio"/>	2
	<input type="radio"/>	3
<input type="button" value="Initialization"/>		
<input type="button" value="Simulation"/>	<input type="button" value="Pause"/>	

Figure 4.7: Paramètres de simulation.

b. Partie de zone de simulation

Cette partie représente la zone de simulation.

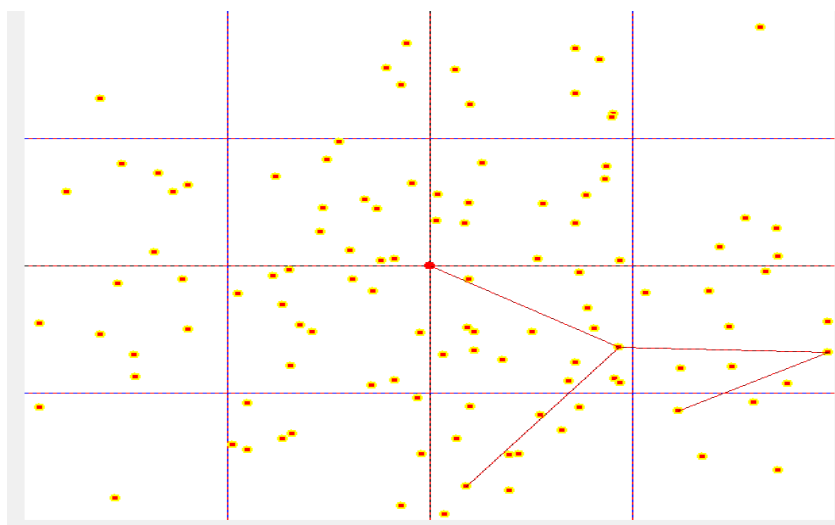


Figure 4.8: Zone de simulation.

c. Partie de résultats de simulation

La partie se constitue par:

- Energie totale.
- Itération courante (Round)
- Energie résiduelle.

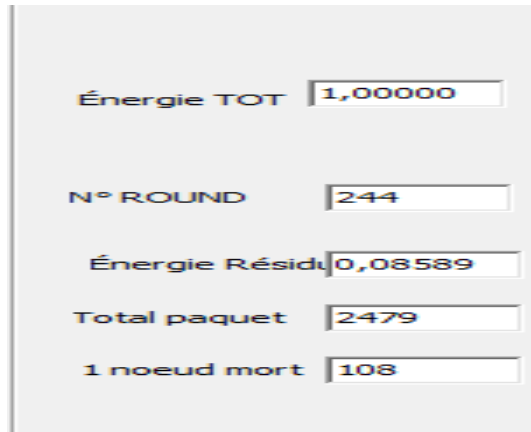


Figure 4.9: Résultats de simulation.

d. Partie d’affichage des graphes

Un bouton " Afficher graphes" qui sert à résumer les résultats sous forme des graphes.

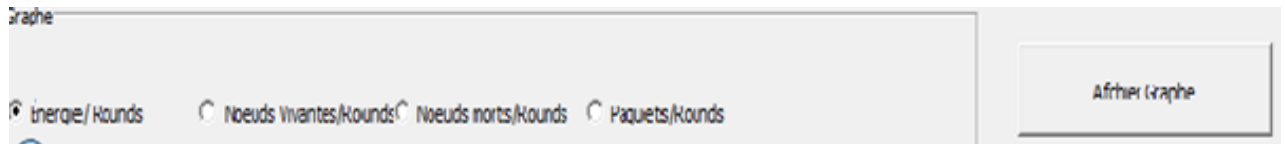


Figure 4.10:Affichage des graphes

4.6.2 Résultats de simulation

a) Les paramètres de simulation

Paramètres	Contexte
Surface de déploiement	100m X 100m
Nombre de capteurs	100
Position de la station de base	(50,50)m
Déploiement de nœuds	Selon le scénario choisi
Taille d’un paquet dedonnées	500 Byte
E_0	0.1 J
E_{elec}	50nJ/bit
E_{fs}	10pJ/bit/m ²
E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ²
E_{da}	5pJ/bit/sig

Tableau 4.2: Paramètres de simulation.

b) Analyse des résultats

Nous avons effectué plusieurs simulations de notre approche de routage Arb_Corr dans les trois scénarios et nous avons gardé les mêmes paramètres de simulation cités dans le tableau 4.1. Les résultats des figures ci-après représentent la moyenne de ces simulations.

b1) Nombre de rounds

D'après la comparaison, scénario1 Arb_Corr a environ 2431 rounds pendant scénario2 a environ 38 rounds, scénario3 environ 30 rounds et donc on conclure que la durée de vie de scénario1 de la technique Arb_Corr est supérieure que la durée de vie deux scénarios (2,3) à cause de données transmises à Station de Base et l'énergie résiduelle dans le réseau sont différents entre les trois scénarios.

b2) Données transmises à la SB

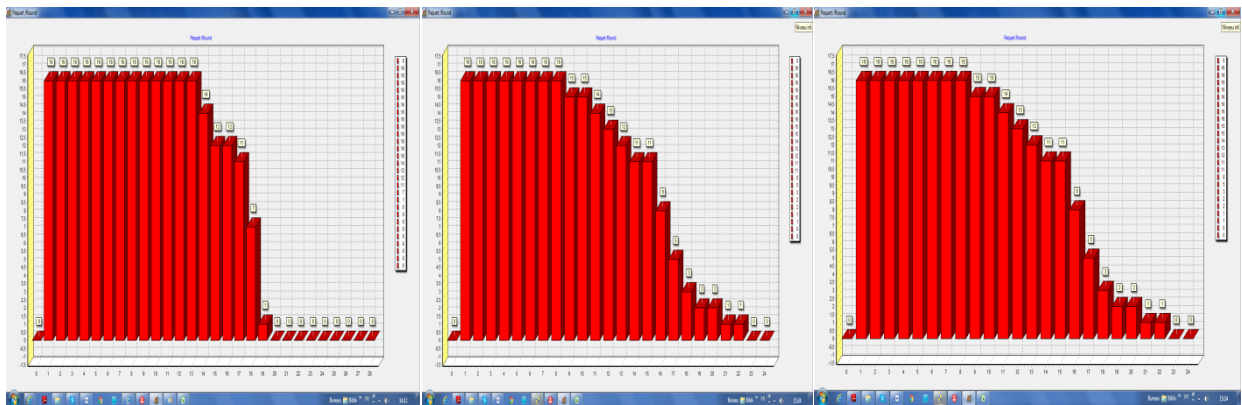


Figure 4.11: Nombre de données transmises à la SB Vs nombre de rounds.

La figure 4.11 représente les données transmises à la SB versus le nombre de rounds. Il est clair que la quantité de données transmise à la SB par Arb_Corr (scénario 1) est plus grande que la quantité de données transmise par les d'autres scénarios (2,3) car le nombre de points de communication avec la SB durant chaque round dans scénario 1, qui sont les capteurs. L'envoi beaucoup et garanti à la SB n'est pas un bon résultat pour la performance d'un protocole de routage puisque tous les nœuds ont la même capacité de collection de quantités physiques tels que la température, l'humidité, la vibration...etc. L'efficacité d'Arb-Corr apparaît dans la livraison d'un nombre plus faible de messages de données à la SB grâce à une seule structure (fils_père).

b3) Nœuds vivants

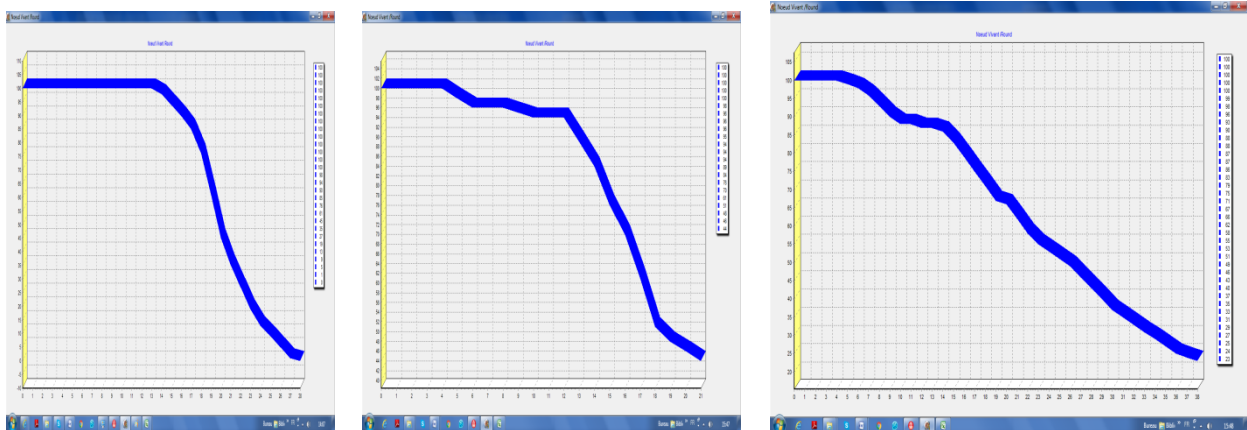


Figure 4.12: Nombre de nœuds vivants Vs nombre de rounds.

La figure 4.12 illustre le nombre de nœuds sur vivants au cours du nombre de rounds pour les trois scénarios de la technique hiérarchiques Arb_Corr. Les résultats de la figure montrent clairement que Arb_Corr(scénario1) a de meilleures performances que les d'autre scénario(2,3) Cela vient du fait que dans cette dernière, les capteurs transmettent directement des paquets à la SB. Dans le cas pas d'existence des capteurs en niveau N . Donc, ses énergies vont diminuer rapidement, ce qu'il cause la réélection de capteurs , et par conséquence le surcote de consommation de l'énergie .Cependant, la technique Arb_Corr (scénario1) résolut ce problème avec un seul nœud de sub_zone dans un niveau N (fils) qui fait la transmission de données à le père d'un autre sub_zone de niveau N+1 qui lui-même à agréger et transmettre à la SB. En effet, La technique Arb_Corr applique une meilleure acquisition de l'énergie du réseau lors de la construction d'arbre.

b4) Le premier nœud qui mort

C'est la technique Arbre corrélation(Arb-Corr) qui perde le premier nœud dans une itération égale à environ 9 en scénario2,et à environ6 en scénario3, cependant que scénario1 perde son premier nœud dans un tour qui égale à environ 1574.

4.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre contribution et l'implémentation de protocole de routage Arb-Corr (scénario1) et nous avons le comparé avec les d'autres scénarios(2,3) en terme de l'économie de la consommation d'énergie dans les RCSFs. Nous fournissons une analyse pour montrer le bien fondé et l'efficacité des protocoles hiérarchiques en faisant une comparaison de résultats de simulation entre les trois scénarios . la technique Arb_Corr (scénario1) élimine les frais généraux (overheadscontrols) de formation dynamique. Afin d'éviter le mort d'un nœud à un emplacement aléatoire de chaque sub_zone dans un niveau N, les nœuds(pères) prennent leurs tours de transmettre les données fusionnées à la SB. Cela contribue à équilibrer l'appauvrissement d'énergie du réseau. les autres scénarios(2,3) .

D'après la comparaison, on conclure que le scénario 1 fonctionne plus mille fois mieux que les autres scénarios (2,3) en vue de minimisation de consommation d'énergie et par conséquent le prolongement de la durée de vie de réseau .

Conclusion générale

La problématique d'économie d'énergie restera pour plusieurs années encore une préoccupation centrale dans l'espace de recherche autour des RCSF. Elle fonde sa stratégie sur l'utilisation des moyens matériels et logiciels pour minimiser au maximum la dépense énergétique nécessaire dans le but de faire fonctionner correctement le réseau le plus longtemps possible. Il s'agit précisément des dépenses pour alimenter les composantes internes d'un nœud et les dépenses exigées par les protocoles de communication. Le problème majeur est lié essentiellement à la nécessité fondamentale d'alimenter en permanence les nœuds capteurs à l'aide d'une source d'énergie embarquée (les batteries) pour assurer une longévité aux nœuds capteurs et au réseau. Autrement dit, sans cette énergie, le réseau est incapable de fonctionner pour satisfaire certains besoins de l'application sous-jacente, il devient ainsi inutile et son remplacement s'impose souvent. Ce remplacement a certainement un impact financier direct grâce au nombre important de nœuds capteurs à redéployer, et sur le fonctionnement même de l'application (succession de ces opérations de redéploiement).

Les solutions à économie d'énergie proposées jusqu'à ce jour contribuent certes à apporter quelques éléments de réponse pour faire face à cette problématique, mais elles resteront limitées à certaines catégories d'applications des RCSFs. Il s'agit en général d'applications pour lesquelles l'exigence en terme de durée de vie est plus ou moins raisonnable, i.e. de l'ordre de quelques mois voir quelques années seulement avec possibilité de redéploiement. Cependant, ces solutions deviennent inefficaces face à de nouvelles applications émergentes dont la durée de vie du réseau pourrait atteindre des dizaines d'années, ou même plus.

Nous avons fournis dans cette étude une analyse pour montrer le bien-fondé et l'efficacité du choix de la technique Arbre Corrélation sur la consommation et la gestion de l'énergie, ces résultats sont fournis par le langage de programmation Borland C++ Builder 2010 version 14.0.

Les réseaux de capteurs constituent un axe de recherche très fertile surtout la problématique de l'énergie. La simulation est une étape intermédiaire pour valider un certain scénario ou valider une théorie, mais l'implémentation réelle est une étape finale pour les valider. Comme perspective, nous proposons les points suivants pour améliorer la performance de notre technique face à l'économie de l'énergie :

- Diminuer les surfaces des sub_zones pour améliorer la corrélation entre les données.
- Examiner le cas de plusieurs scénarios et faire des comparaisons entre eux.

- Examiner le cas d'une station de base mobile.
- Comparer la technique proposée avec plusieurs scénarios avec autres technique existes dans la littérature voir leur efficacité dans le domaine économie de l'énergie dans RCSFs.

Bibliographie

- [1] FARES Abdelfatah, Rapport de Développement d'une bibliothèque de capteurs, Master Informatique Spécialité : Informatique professionnelle et Recherche en Informatique, Parcours : CASAR, 25/04/2008.
- [2] KAZI TANI Chahrazad, BENHADDOUCHE Wiam, "Implémentation et test d'un protocole de prévention de l'attaque Clone dans un réseau de capteurs sans fil", Master en Informatique, Option: Réseaux et systèmes distribués (R.S.D), 2014.
- [3] Sofiane MOAD, « La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Master Recherche 2 en Informatique IFSIC-Rennes 1, 2008.
- [4] Rumpa Mukherjee, Arindom Mukherjee, "A Survey on Different Approaches for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks" in International Journal of Advanced Computer Research, 2013.
- [5] AjitaSrivastava, Kumar Rahul Dev, Vinay Kumar Nassa, "Energy Conservation in Wireless Sensor Network" in International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, November 2013
- [6] SaouceneMahfoudh, Pascale Minet, "Survey of energy efficient strategies in wireless ad hoc and sensor networks" in Networking, 2008. ICN 2008. Seventh International Conference on,2008.
- [7] Mohamed Younis, Tamer Nadeem, « Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks » in Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, 2006.
- [8] M. Ilyas and I. Mahgoub. "Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [9] Paolo Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks" in ACM computing surveys (CSUR), 2005.
- [10] Sri Kumar, Feng Zhao, David Shepherd, "Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks" in Signal Processing Magazine, IEEE, 2002.
- [11] SwethaNarayanaswamy, VikasKawadia, Ramavarapu S Sreenivas, PRe Kumar, "Power control in ad-hoc networks : Theory, architecture, algorithm and implementation of the Compowprotocol" in European wireless conference, 2006.

- [12] Han Namgoong, Dongman Lee, Dukyun Nam, "Energy efficient topology for wireless microsensor networks" in Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks, 2005.
- [13] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks" in INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings, 2002.
- [14] Holger Karl, Andreas Willig, "Protocols and architectures for wireless sensor networks". John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [15] D. Niculescu, « Topics In Ad-Hoc Networks: Communication Paradigms for Sensor Networks », NEC Laboratories America, IEEE Communications Magazine, Mars 2005.
- [16] C. Townsend et S. Arms, "Wireless Sensor Networks: Principles and Applications", MicroStrain, Inc.
- [17] R. Jurdak, « Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: A Cross-Layer Design perspective », University College Dublin, 2007.
- [18] C. Intanagonwiwat, R. Govindan et D. Estrin, « Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks », Proceedings ACM MobiCom'00, pp.56-67, Boston, MA, Août 2000.
- [19] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann et F. Silva, « Directed diffusion for wireless sensor networking », IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 11, N°1, pp.2-16, Février 2003,.
- [20] D. Braginsky et D. Estrin, « Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks » dans les démarches du premier atelier sur les réseaux de capteurs et applications (WSNA), Atlanta, GA, Octobre 2002.
- [21] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci, "A survey on sensor networks" in Communications magazine, IEEE, vol. 40, no. 8, 2002.
- [22] Holger Karl, Andreas Willig, "Protocols and architectures for wireless sensor networks". John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [23] Kacimi Rahim, Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [24] J.N Al-Karakiet A. E. Kamal, « Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey », Magazine: IEEE Communications, vol. 11, N° 6, pp. 6-28, Dec. 2004..
- [22] K. Akkaya et M. Younis, « A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks ». Elsevier, 2003.

- [23] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan et H. Balakrishnan, «Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks», dans les démarches de la société d'ordinateur d'IEEE à la trente troisième conférence internationale d'Hawaï sur les sciences de systèmes (HICSS '00), Vol. 8, pp. 8020, Washington DC, USA, Janvier 2000.
- [24] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan et H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks" in IEEE Transactions on Wireless Communications (October 2002), vol. 1(4), pp. 660-670.
- [25] Y. Yao et J. Gehrke, « The cougar approach to in-network query processing in sensor networks », dans l'enregistrement de SIGMOD, Septembre 2002.
- [26] N. Sadagopan, B. Krishnamachari et A. Helmy "The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks", In Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA), pp. 149–155, Anchorage, AK, May, 2003,
- [27] Y. Yu, D. Estrin et R. Govindan, «Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks» rapport technique du département d'informatique de l'université UCLA, May 2001.
- [28] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian et E. Cayirci, « Wireless Sensor networks: a Survey » Elsevier , Computer Networks, Vol. 38, N° 4, pp. 393-422, 2002,
- [29] S. Kumar Singh, M P Singh et D K Singh, « Routing Protocols in Wireless Sensor Networks –A Survey » revue internationale de l'informatique et de l'enquête d'ingénierie (IJCSSES) Vol.1, N°2, Novembre 2010.
- [30] L J G Villalba et A L S Orozco, A T Cabrera et C J B Abbas, « Review: Routing Protocols in Wireless Sensor Networks », 26 Octobre 2009, [En ligne], www.mdpi.com/journal/sensors.
- [31] M. Ilyas et I. Mahgoub, «Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems», CRC Press LLC, 2005.
- [32] T. He et al. , «SPEED: A stateless Protocol for real-time communication in Sensor networks», International Conference on Distributed Computing Systems ICDCS, 2003.
- [33] A. Manjeshwar et D.P. Agrawal, « TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks », 15ème colloque international sur le traitement parallèle et distribué (IPDPS-01), 2001.
- [34] A. Manjeshwar et D.P. Agrawal, « APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks », 16ème Colloque International sur le traitement parallèle et distribué (IPDPS-02), 2002.