

Table des matières

Remerciements	
Glossaire	i
Table des matières	ii
Liste des figures	v
Introduction générale.....	1

Chapitre I Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction	3
I.2 Réseaux ad hoc	3
I.2.1 Description générale	3
I.2.2 Les problèmes du réseau Ad hoc	4
I.3 Réseaux de capteurs sans fil.....	5
I.3.1 Définition.....	5
I.3.2 Caractéristiques des RCSFs.....	5
I.3.3 Architecture d'un capteur	7
I.3.3.1 Architecture matérielle	7
I.3.3.2 Architecture logicielle	9
I.3.4 Architecture d'un RCSF	9
I.4 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux ad hoc.....	10
I.5 La communication dans les RCSF	11
I.5.1 Pile protocolaire	11
I.5.1.1 Aspects de la couche Physique.....	12
I.5.1.2 Aspects de la couche MAC	13
I.5.1.3 Aspects de la couche réseau	13
I.5.1.4 Aspects de la couche de transport	13
I.5.1.5 Aspects de la couche application	13
I.5.2 Plan de gestion	14
I.6 Consommation et conservation d'énergie dans les RCSF	14
I.7 Applications des RCSFs	15
I.7.1 Applications militaires.....	16
I.7.2 Applications à la sécurité.....	16
I.7.3 Applications environnementales.....	17
I.7.4 Applications médicales.....	18
I.7.5 Applications commerciales.....	19
I.8 Facteurs et contraintes des RCSFs	20
I.8.1 Contraintes conceptuelles	20
I.8.2 Contraintes matérielles	21
I.9 Conclusion.....	21

Chapitre II Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

II.1	Introduction	22
II.2	Les critères de conception d'un protocole de routage dans les RCSFs.....	22
II.2.1	Déploiement des nœuds	23
II.2.2	Consommation d'énergie	23
II.2.3	Modèle de délivrance des données	23
II.2.4	Hétérogénéité Nœud/Lien.....	24
II.2.5	Tolérance aux pannes.....	24
II.2.6	Scalabilité.....	24
II.2.7	Dynamicité du réseau.....	25
II.2.8	Media de transmission	25
II.2.9	Connectivité	25
II.2.10	Couverture.....	26
II.2.11	Agrégation des données	26
II.2.12	Qualité de service.....	26
II.2.13	Capacité de communication	26
II.3	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs	27
II.3.1	Classification selon la structure du réseau	27
II.3.1.1	Les protocoles à topologie plate.....	28
II.3.1.2	Les protocoles géographiques	31
II.3.1.3	Les protocoles hiérarchiques	34
II.3.1.4	Les protocoles considérant les qualités de services	35
II.4	Métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage	36
II.4.1	Le nombre de sauts	36
II.4.2	Le temps de traverser un saut.....	36
II.4.3	La différence en temps d'arrivée de deux paquets par saut	36
II.4.4	La notion du coût	37
II.4.5	La notion de puissance.....	37
II.4.6	La notion de coût-puissance.....	37
II.4.7	Le temps du premier nœud à mourir	37
II.4.8	Le temps du dernier nœud à mourir	37
II.5	Conclusion.....	38

Chapitre III Routage hiérarchique dans les RCSFs

III.1	Introduction	39
III.2	Approches dérivées des protocoles hiérarchiques	39
III.3	Caractéristiques d'un protocole hiérarchique	40
III.3.1	L'algorithme de clustering utilisé	40
III.3.2	La réélection des CHs	41
III.3.3	La nature des clusters générés.....	41
III.3.4	La communication intra-cluster	41
III.3.5	La communication inter-cluster	41

III.3.6	Le niveau d'agrégation de données.....	42
III.4	Exemples des protocoles de routage hiérarchique	42
III.4.1	Le protocole de routage LEACH	42
III.4.1.1	Architecture de communication de LEACH	42
III.4.1.2	Principe de fonctionnement de LEACH	43
III.4.1.3	Avantages et inconvénients de LEACH	45
III.4.2	Le protocole de routage LEACH-C	46
III.4.3	Le protocole de routage PEGASIS	47
III.4.3.1	La construction des chaînes	48
III.4.3.2	Déroulement de l'algorithme.....	49
III.4.3.3	Avantages et inconvénients du protocole PEGASIS	50
III.5	Conclusion.....	51

Chapitre VI Evaluation des performances à travers la simulation

VI.1	Introduction	52
VI.2	Environnement de travail	52
VI.2.1	Les outils de simulation	52
VI.2.2	Présentation de simulateur NS2	53
VI.2.3	Modèle radio	54
VI.2.4	Paramètres de simulation	55
VI.3	Evaluation des performances	56
VI.3.1	La consommation d'énergie.....	56
VI.3.2	La durée de vie du réseau.....	57
VI.4	Conclusion.....	59
	Conclusion générale	60
	Références Bibliographiques	61

Liste des figures

Figure.I.1 La modélisation d'un réseau Ad hoc.....	4
Figure.I.2 La composition d'un nœud de capteur.....	8
Figure.I.3 Architecture d'un RCSF	10
Figure.I.4 La pile protocolaire dans un réseau de capteurs	13
Figure.I.5 Modèle de consommation d'énergie.....	16
Figure.I.6 Réseau de capteurs militaire	17
Figure.I.7 Applications environnementales	18
Figure.I.8 Ensemble de capteurs dans un corps <i>humain</i>	19
Figure.II.1 Classification des protocoles de routage selon la structure de réseau	28
Figure.II.2 Le protocole SPIN	30
Figure.II.3 Fonctionnement du protocole DD	31
Figure.II.4 Transitions des états dans GAF	33
Figure.II.5 Routage hiérarchique.....	35
Figure III.1 Configurations pour les RCSF découpés	40
Figure III.2 Architecture de communication du protocole LEACH	43
Figure III.3 Construction de chaînes en utilisant l'algorithme avide	48
Figure III.4 Approche de déplacement de jeton	49
Figure VI.1 Architecture générale du NS2	54
Figure VI.2 Topologie de 100 nœuds aléatoires pour un réseau de $(100 \times 100) \text{ m}^2$	55
Figure VI.3 Energie consommée dans le réseau	57
Figure VI.4 Nombre de nœuds vivants	58
Liste des tableaux	
Tableau VI.1 Les paramètres des simulations	56

Glossaire

A

ADV: Advertise

B

BS: Base Station

C

CH: ClusterHead

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

D

DD: Direct Diffusion

F

FDMA: Frequency Division Multiple Access

G

GAF: Geographic adaptive fidelity

GEAR: Geographic and energy-aware routing

GPS: Global Positioning System

I

ISO: International Standardization Organization

L

LEACH: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LEACH-C: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy- Centralise

M

MIT: Massachusetts Institute of Technology

N

NAM: Network AniMator

O

OSI: Open System Inter-connexion

OTcl: Object-oriented Tool Command Language

P

PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

R

RCSFs : Réseaux de Capteurs sans fil

REQ : Request

S

SPIN: Sensor Protocols for Information via Negotiation

T

Tcl : Tool Command Language

TDMA: Time Devision Multiple Access

Introduction générale

Introduction générale

Les progrès réalisés lors de ces dernières années dans les domaines de la microélectronique, de la micromécanique, et des technologies de communication sans fil, ont permis de produire avec un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. Ces derniers, appelés 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 le canal sans fil. Ainsi, il devient facile de déployer les capteurs dans des endroits parfois même difficiles d'accès, pour créer un réseau de capteurs sans fil, en évitant l'usage des câbles depuis longtemps qui avaient comme principaux défauts d'être encombrants et couteux.

Avec l'émergence des Réseaux de Capteurs sans fil, de nouvelles thématiques ont été ouvertes et de nouveaux défis ont vu le jour pour répondre aux besoins des personnes et aux exigences de plusieurs domaines d'application (industriel, culturel, environnemental) : observation de la vie des espèces rares, surveillance de la structure des infrastructures, optimisation de traitement pour les patients, etc. Ces problématiques motivent de nombreux chercheurs. En effet, malgré les avancées remarquables dans ce domaine, il reste encore beaucoup de problèmes à résoudre. Ainsi, de nouveaux protocoles ont été proposés pour traiter le contrôle de l'accès au médium, le routage, etc. dans les réseaux de capteurs.

Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple les routeurs dans les réseaux filaires). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination.

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser aux problèmes relatifs au routage de données sur les RCSFs et plus précisément le routage hiérarchique de données. Ce thème de recherche est très important car il offre un fondement indispensable à toutes les autres couches supérieures de ces réseaux. Le routage hiérarchique est considéré comme un outil permettant plus de performance en ce qui concerne la consommation d'énergie par rapport aux autres types de routage, à savoir, le routage à topologie plate et le routage géographique.

Dans un protocole de routage à topologie plate, tous les nœuds effectuent les mêmes tâches et disséminent des données souvent redondantes, vue la densité d'un RCSF, vers le puits, ce qui épuise leur capacités énergétiques plus rapidement. Le routage géographique nécessite, quant à lui, des informations sur la localisation géographiques des nœuds pour parvenir à transmettre les données vers la zone la plus adéquate, ce qui génère une surconsommation de l'énergie au niveau du réseau.

Par contre, le routage hiérarchique regroupe les nœuds en clusters (groupes) où le ClusterHead de chaque groupe a pour principale fonction la gestion des communications de paquets transmis par ses membres de groupe ou dirigés vers ces derniers. Une autre fonction intéressante qui peut être attribuée à

Introduction générale

ces ClusterHeads est l'agrégation de données pour limiter la taille des données transmises vers la station de base. Les autres nœuds membres ne se chargent que d'une dissémination locale vers leurs ClusterHeads. En plus de la technique des clusters, nous allons parler de celle basée sur les chaînes.

La démarche adoptée dans ce travail consiste en une première phase à la présentation d'un état de l'art sur les protocoles de routage dans les RCSFs. En deuxième phase, l'objectif a été de réaliser une simulation de deux protocoles de routage hiérarchique, de différentes approches pour pouvoir sélectionner celle qui a des résultats plus performants en termes de durée de vie du réseau.

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en quatre chapitres selon un plan méthodologique suivant :

Dans le premier chapitre, nous verrons les concepts généraux relatifs au domaine des réseaux de capteurs sans fil. Dans le deuxième chapitre, nous traiterons le défi majeur des RCSFs qui est le routage de données d'une manière générale où seront exposées les considérations de conception des protocoles de routage et les différentes approches de routage. Avant de réaliser la simulation des trois protocoles LEACH, LEACH-C et PEGASIS dans le quatrième chapitre, Nous nous intéressons plus particulièrement, au routage hiérarchique de données sur les RCSFs dans le troisième chapitre.

Chapitre I Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction

De nos jours, grâce à la technologie avancée des semi-conducteurs, et plus particulièrement à l'évolution de la technologie radio et de la communication sans fil, les réseaux sans fil connaissent un essor considérable. Parmi ces réseaux figurent les réseaux de capteurs sans fil [1].

Les réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux de nœuds sans fil agissants comme des générateurs et des relais à des données en contrôlant un phénomène physique. Ils sont considérés comme un type particulier des réseaux ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des capteurs intelligents [2]. Ces réseaux occupent de plus en plus de champs d'applications dans la vie quotidienne allant du contrôle de la température et de l'humidité à l'estimation du niveau des batteries à hydrogène.

Les RCSFs sont une nouvelle technologie qui a survécu après les grands progrès technologiques concernant le développement des capteurs intelligents. Selon MIT's Technology Review, il s'agit de l'une des dix nouvelles technologies qui vont influer sur notre manière de vivre et de travailler.

Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, leurs applications, et nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil.

I.2 Réseaux ad hoc

I.2.1 Description générale

Un réseau mobile ad Hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc NETwork), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque et dont le seul moyen de communication est l'utilisation des interfaces sans-fil, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée.

Les réseaux ad hoc sont idéaux pour les applications caractérisées par une absence d'une infrastructure préexistante, telles que les applications militaires et les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblement de terre, etc.) et les missions d'exploration.

Un réseau ad hoc peut être modélisé par un graphe $G_t = (V_t, E_t)$ où V_t représente l'ensemble des nœuds (les unités ou les hôtes mobiles) du réseau et E_t modélise l'ensemble des connexions qui existent entre ces nœuds. Si $e = (u, v)$ appartient à E_t , cela signifie que les nœuds u et v sont en mesure de communiquer directement à l'instant t (figure I.1).

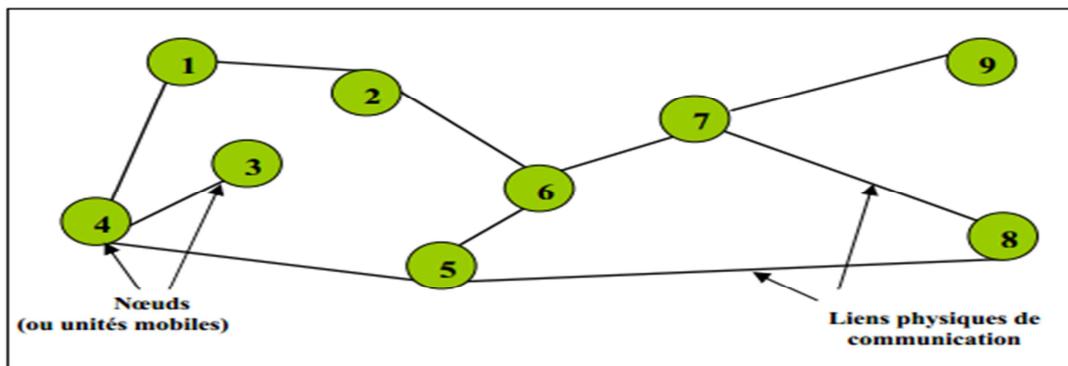


Figure I.1 La modélisation d'un réseau Ad hoc

D'une façon générale, les réseaux ad hoc sont utilisés dans toute application où le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignant, soit parce que difficile à mettre en place, soit parce que la durée d'utilisation du réseau ne justifie pas la persistance du câblage. En plus, aucune supposition ou limitation n'est faite sur la taille du réseau ad hoc, le réseau peut contenir des centaines ou des milliers d'unités mobiles [3].

I.2.2 Les problèmes du réseau Ad hoc

Les principaux problèmes des réseaux ad hoc et les problématiques à gérer sont [4] :

- Absence d'infrastructure
- Bande passante limitée
- Perte de données
- Perte de routes
- Contraintes de consommation d'énergie
- Sécurité limitée
- Erreur de transmission
- Interférences
- Nœuds cachés

I.3 Réseaux de capteurs sans fil

I.3.1 Définition

Les réseaux de capteurs sont des systèmes qui regroupent plusieurs capteurs capables de sonder l'environnement dans lequel ils se trouvent et remonter l'information vers certains nœuds (Sink) déployés qui sont en mesure de relayer l'information à grande échelle afin de couvrir une zone cible. Cette zone peut être géographique ou délimitée par un système plus ou moins étendu [5].

Les réseaux de capteurs utilisent un grand nombre de dispositifs très petits, nommés "nœuds capteurs", pour former un réseau sans infrastructure établie. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de détecter son environnement et de traiter l'information au niveau local ou de l'envoyer à un ou plusieurs points de collecte à l'aide d'une connexion sans fil [6].

I.3.2 Caractéristiques des RCSFs

Un RCSF possède plusieurs caractéristiques dont les principales sont [7] :

La consommation réduite d'énergie

Les nœuds capteurs utilisent des batteries de taille minuscule comme ressources en énergie, ce qui limite leur durée de vie. La spécificité des applications des RCSFs (militaires, sismiques et autres) fait que la recharge ou le remplacement de ces batteries est une tâche difficile ou presque impossible, ce qui nous mène à déduire que la durée de vie d'un nœud est essentiellement dépendante de la durée de vie de la batterie. Ainsi, la méthode de gestion de consommation d'énergie constitue une contrainte majeure dans ce type de réseau.

L'auto-configuration des nœuds capteurs

Dans un RCSF, les nœuds sont déployés soit d'une manière aléatoire (missile, avion, etc.), soit placés nœud par nœud par un humain ou un robot, et ceci à l'intérieur ou autour du phénomène observé (champ de guerre, surface volcanique, patient malade ...) [8]. Ainsi, un nœud capteur doit avoir des capacités d'une part, pour s'auto-configurer dans le réseau, et d'autre part pour collaborer avec les autres nœuds dans le but de reconfigurer dynamiquement le réseau en cas de changement de topologie du réseau [9].

Dans un RCSF, chaque nœud X possède une unité émettrice/réceptrice qui lui permet de communiquer avec les nœuds qui lui sont proches ; En échangeant des informations

avec ces derniers, le nœud X pourra alors découvrir ses nœuds voisins et ainsi connaître la méthode de routage qu'il va adopter selon les besoins de l'application [10].

L'auto-configuration apparaît comme une caractéristique nécessaire dans le cas des RCSFs étant donné que d'une part, leur déploiement s'effectue d'une manière aléatoire dans la majorité des applications, et d'autre part, le nombre des nœuds capteurs est très grand.

La scalabilité

Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels (personnel, local ou étendu), un RCSF peut contenir un très grand nombre de nœuds capteurs (des centaines, des milliers) [8]. Un réseau de capteur est scalable parce qu'il a la faculté d'accepter un très grand nombre de nœuds qui collaborent ensemble afin d'atteindre un objectif commun.

Tolérance aux pannes

Dans le cas de disfonctionnement d'un nœud (manque d'énergie, interférences avec l'environnement d'observation) ou aussi en cas d'ajout de nouveaux nœuds capteurs dans le réseau, ce nœud doit continuer à fonctionner normalement sans interruption [8]. Ceci explique le fait qu'un RCSF n'adopte pas de topologie fixe mais plutôt dynamique.

Une densité importante des nœuds

Les RCSFs sont caractérisés par leur forte densité. Cette densité peut atteindre, selon le type d'application, 20 nœuds/m³ [8].

La capacité de communication

Elle peut prendre deux aspects : le multi saut ou à un seul saut. Parce que le multi saut est moins énergivore, il reste le type de communication le plus sollicité par les applications de RCSF qui requièrent une faible consommation d'énergie [11].

Les types de communication

Il existe différents types de communication utilisée dans les RCSF :

- **Unicast** : Ce type de communication est utilisé pour échanger des informations entre deux nœuds sur le réseau.
- **Broadcast** : La station de base ou Sink transmet des informations vers tous les nœuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données bien précises (par exemple : la température dans la région A), des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle [8].
- **Local Gossip** : Ce type de communication est utilisé par des nœuds situés dans une région bien déterminée qui collaborent ensemble afin d'avoir une meilleure estimation de l'évènement observé et d'éviter l'émission du même message vers le nœud Sink ce qui contribue à consommer moins d'énergie.

- **Converge-cast** : Il est utilisé dans les communications entre un groupe de nœuds et un nœud bien spécifique (qui peut être le « Sink »). L'avantage de ce type de communication est la diminution de contrôle d'entête des paquets (« control overhead ») ce qui économise l'énergie au niveau du nœud récepteur [9].
- **Multicast** : Il permet une communication entre un nœud et un groupe de nœuds. Ce type de communication est utilisé dans les protocoles qui incluent le clustering dans lesquels, le Clusterhead s'intéresse à communiquer avec un groupe de nœuds [8].

Une architecture « data-centric »

Du fait que le remplacement ou la recharge des batteries des nœuds capteurs est une tâche non pratique et difficile à réaliser, alors il est d'usage normal qu'on trouve des nœuds capteurs redondants (effectuant la même tâche dans la même région) ;

L'importance d'un nœud particulier est, par conséquent, réduite par rapport à l'importance attribuée aux données observées par les nœuds.

Ce type d'architecture diffère des architectures « node-centric » adoptées par les réseaux traditionnels où les nœuds possèdent une place importante (exemple : un utilisateur qui veut connecter son laptop au serveur web X) [9].

Une collaboration entre les nœuds

Les contraintes strictes de consommation d'énergie mènent les nœuds capteurs à détecter et traiter les données d'une manière coopérative afin d'éviter le traitement redondant d'une même donnée observée, source de la perte d'énergie [6].

La bande passante (ou capacité du canal)

C'est une caractéristique beaucoup plus importante dans les réseaux cellulaires (GSM) et les réseaux locaux sans fils (WLAN), que dans les RCSFs ; le débit étant en effet un objectif secondaire pour les RCSFs [12].

I.3.3 Architecture d'un capteur

I.3.3.1 Architecture matérielle

Un capteur est un petit appareil doté de mécanismes lui permettant de relever des informations sur son environnement. La nature de ces informations varie très largement selon l'utilisation qui est faite du capteur [10].

Un nœud de capteurs sans fil est composé de quatre unités essentielles : l'unité d'alimentation en énergie, l'unité de communication, l'unité de traitement et l'unité de détection (figure I.2) [6].

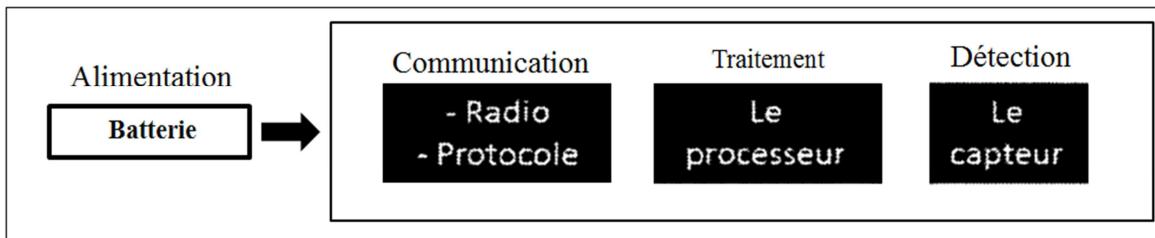


Figure.I.2 La composition d'un nœud de capteur

- Unité d'alimentation

Comme les nœuds capteurs sont en technologie sans fil, ses ressources énergétiques sont très limitées. L'alimentation consiste généralement en des batteries, ou même des batteries avec une alimentation par des énergies renouvelables (photovoltaïque par exemple).

- Unité de traitement

Cette unité est incluse dans le microprocesseur ou le microcontrôleur du nœud de capteur. Elle est responsable de tous les traitements des données captées par le détecteur ou reçues par la radio, que devrait effectuer un nœud capteur. Ces microprocesseurs et microcontrôleurs pourraient inclure plusieurs fonctionnalités, à savoir, une unité de traitement, une mémoire, des interfaces de communication avec le monde extérieur (UART, USB, SPI, et I2C), et des convertisseurs A/N [6].

- Unité de communication

La communication dans un RCSR se fait à l'aide de modules radio (modules RF) et par le moyen de protocoles de communication. Le module RF et le protocole de communication se trouvent dans cette unité. Les modules RF présentent certaines caractéristiques liées à la nature de l'antenne et au courant électrique généré [6].

- Unité de détection

Le rôle principal d'un capteur, qui est la détection, est assuré par cette unité. La détection est liée soit à un changement d'un processus physique à contrôler ou suite à une demande de mesure ou d'estimation. Dans les deux cas, le capteur est en mode veille jusqu'à une interruption externe. Le passage du mode veille au mode actif prend un

certain temps qui est le temps de réveil. Le passage en mode veille prend aussi un certain temps.

Ces deux caractéristiques temporelles différencient les capteurs les uns des autres [4].

La technologie de ces unités de détection est en fonction de l’application à laquelle est destiné ce capteur [4].

I.3.3.2 Architecture logicielle

L’un des systèmes d’exploitation les plus connus dans le domaine des RCSFs est « TinyOS ». C’est un système d’exploitation open-source.

TinyOS respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s’inscrit dans le respect des contraintes de mémoires qu’observent les réseaux de capteurs.

Pour autant, la bibliothèque de composant de TinyOS est particulièrement complète puisqu’on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d’acquisition de données. L’ensemble de ces composants peuvent être utilisés tels quels, ils peuvent aussi être adaptés à une application précise.

En s’appuyant sur un fonctionnement événementiel, TinyOS propose à l’utilisateur une gestion très précise de la consommation du capteur et permet de mieux s’adapter à la nature aléatoire de la communication sans fil entre interfaces physiques.

I.3.4 Architecture d’un RCSF

Un RCSF consiste en un ensemble de nœuds capteurs variant de quelques dizaines d’éléments à plusieurs milliers, placés de manière plus au moins aléatoire dans une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d’intérêt, afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données d’une manière autonome. Les noeuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelé nœud puits ou Sink en anglais. Le puits transmet ensuite ces données par internet ou par satellite à l’ordinateur central «gestionnaire de tâches» afin de les analyser et prendre des décisions. Ainsi l’utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits.

En plus des nœuds capteurs, le modèle peut introduire les super-nœuds appelés des passerelles (Gateway). Ces derniers possèdent une source d’énergie importante et des

capacités de traitement et de stockage plus élevées comparativement aux nœuds capteurs [16].

Ils peuvent ainsi être utilisés pour exécuter des tâches plus complexes comme la fusion des données issues des capteurs d'une même zone. Dans le cas le plus simple, les nœuds capteurs seront dans le voisinage direct du puits. Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, ils ne sont pas tous dans le voisinage du puits et les données seront acheminées du nœud source vers le puits en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts (figure I.3).

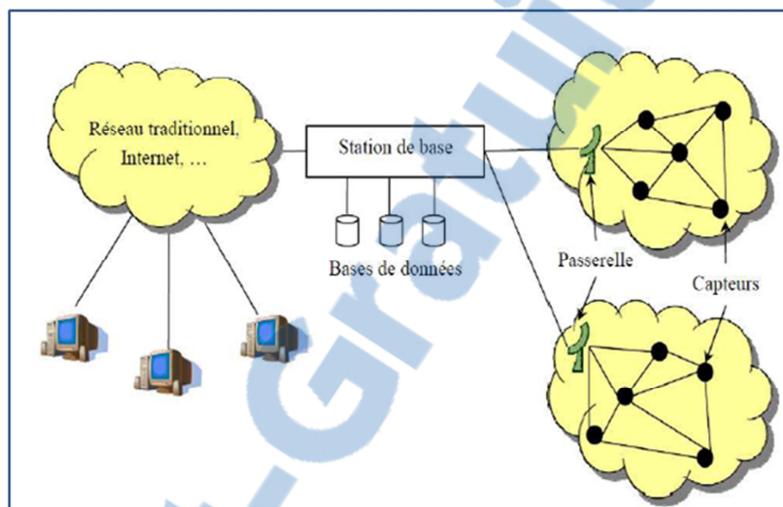


Figure.I.3 Architecture d'un RCSF

I.4 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux ad hoc

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent comparés aux réseaux ad hoc (ou MANET) traditionnels car ces deux types de réseaux partagent beaucoup de points communs [13, 14] :

- Tous les deux sont des réseaux sans fil, ce qui fait que la portée de communication est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées et les puissances mise en jeu. Ainsi, les nœuds dans ces types de réseaux sont souvent des configurations multi-sauts.
- Tous les deux sont des réseaux ad hoc, c'est-à-dire, ils fonctionnent sans avoir besoin d'une infrastructure pour la gestion des échanges. De ce fait, ils ont besoin d'être auto-configurables.
- Ces réseaux travaillent sur une bande de fréquences non propriétaire, ce qui rend leurs communications vulnérables aux problèmes d'interférences.
- Les entités de ces réseaux sont souvent alimentées par des batteries.

Malgré les points sur lesquels ces deux types de réseaux convergent, ils diffèrent sur plusieurs aspects. Parmi les points sur lesquels ils divergent, on cite [13, 14, 15] :

- Les entités d'un réseau MANET sont souvent utilisées directement par des êtres humains, comme les portables, les PDA, etc. Dans les réseaux de capteur sans fil les entités interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement ou entre elles.
- Le nombre de nœuds dans un réseau de capteur peut-être beaucoup plus important que dans les réseaux ad hoc (forte scalabilité).
- Les capteurs peuvent être densément déployés (forte densité).
- Le fait que les nœuds dans un RCSF sont souvent déployés dans des environnements hostiles (forêts, volcans, etc.) les rend vulnérables et risque de tomber en panne beaucoup plus souvent que les nœuds dans un réseau MANET (tolérance aux pannes).
- La topologie des capteurs change fréquemment du fait des pannes des nœuds ou de leur mobilité (flexibilité).
- Les échanges de données dans les applications d'un réseau RCSF sont souvent du type collecte de données.
- Les nœuds doivent envoyer vers un puits des informations sur des phénomènes observés (modèle de communication many-to-one) alors que les applications des réseaux MANET sont plus orientées calcul distribué et donc le trafic circule entre tous les nœuds du réseau et dans tous les sens (modèle de communication any-to-any).
- Les réseaux de capteurs utilisent principalement les communications broadcast alors que la plupart des réseaux Ad hoc sont basés sur les communications point à point.
- Les nœuds capteurs sont caractérisés par des ressources plus limitées (ressource d'énergie, puissance de calcul et mémoire). Les nœuds dans un MANET sont plus puissants et possèdent des capacités beaucoup plus importantes.
- Les RCSFs sont qualifiés de réseaux à basse consommation (Low-Power, LP) et à bas débit (Low-Rate, LR), ceci n'est pas le cas des MANET, même si les nœuds d'un MANET sont souvent alimentés sur batteries, ils sont facilement rechargeables.
- Les nœuds capteurs ne possèdent aucune identification (ID) globale telles que les adresses IP dans les réseaux Ad hoc.

I.5 La communication dans les RCSF

I.5.1 Pile protocolaire [16]

La volonté de ne pas favoriser un industriel, la prise en compte de l'hétérogénéité des équipements, et la possibilité d'une évolution et d'une adaptation facile ont nécessité

l'adoption de règles communes de communication de coopération entre les équipements. Ces règles forment un protocole de communication. Traditionnellement, la pile protocolaire utilisée dans le monde des réseaux est organisée suivant un modèle en couches superposées l'une sur l'autre. Chaque couche assure de manière indépendante une partie des fonctionnalités nécessaires à la communication entre les entités du réseau. Elle utilise les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

Différents des réseaux ad hoc traditionnels, les réseaux de capteurs exigent des nouvelles limitations pour la conception des protocoles de communication. Le modèle OSI de l'ISO ne suffit donc plus.

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure I.4. Il existe cinq couches essentielles, la couche physique qui définit le dispositif matériel du nœud de capteur, la couche MAC pour l'accès au canal de transmission, la couche réseau pour la méthode de routage des paquets, la couche transport pour la congestion du réseau et du trafic ainsi que la détection d'erreurs, et la couche application qui définit le rôle de chaque nœud dans le RCSF.

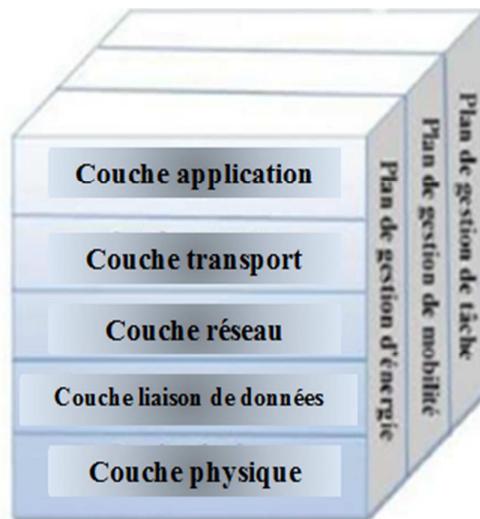


Figure I.4 La pile protocolaire dans un réseau de capteurs

I.5.1.1 Aspects de la couche Physique

La couche physique est responsable du choix de la modulation, de la fréquence, du cryptage et de la détection du signal afin de pouvoir convertir les flux binaires et de les transmettre en signaux radio sur le canal sans fil et vice versa [1].

I.5.1.2 Aspects de la couche MAC

La couche MAC est responsable de l'établissement des liens entre les nœuds afin de garantir une certaine connectivité entre les nœuds [1]. L'accès au canal doit être tel que les collisions entre les transmissions sont minimisées, voire, éliminées [1]. En effet, deux nœuds voisins qui transmettent en même temps peuvent générer ce genre de phénomènes, et ainsi provoquer une collision des paquets et leur perte.

I.5.1.3 Aspects de la couche réseau

La couche réseau est responsable de la découverte et la gestion des routes dans un réseau quelconque. Le routage dans les RCSFs rencontre plusieurs défis dus à la flexibilité de ce genre de réseau, la mobilité des nœuds et l'aspect sans fil des capteurs [1].

I.5.1.4 Aspects de la couche de transport

La couche de transport est responsable du contrôle de la congestion, de délivrer les informations reçues par le nœud à l'application de façon efficace, et de gérer l'existence de plusieurs applications dans un même nœud [1]. D'une autre part, le contrôle du flux de données est aussi une des responsabilités de cette couche [23]. En effet, l'émetteur ne peut pas surcharger le récepteur de paquets plus que ce qu'il peut en recevoir. Le contrôle du flux va de pair avec le contrôle de la congestion, car le premier empêche la surcharge du récepteur, et le second s'occupe de la surcharge du réseau [1].

I.5.1.5 Aspects de la couche application

La couche d'application offre à l'utilisateur une interface d'interaction avec le nœud et, par conséquent, le processus physique à contrôler avec le RCSF [1]. Il existe trois catégories de protocoles de la couche d'application [1] :

- **La compression de données** : L'information à transmettre par l'émetteur est compressée afin de réduire sa taille.
- **Le traitement de requêtes** : Cela revient à traiter les requêtes envoyées par un autre nœud afin d'effectuer une tâche spécifique.
- **La gestion du réseau** : Offrir à l'utilisateur une interface simple pour interagir avec les données collectées, gérer les changements de topologie, adapter les routes et le protocole, gestion du trafic, etc.

I.5.2 Plan de gestion [17]

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

- **Plan de gestion d'énergie :** Un nœud capteur sans fil nécessite seulement une source d'énergie limitée. La vie du nœud montre une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie. Le plan de gestion d'énergie doit gérer la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée au captage.
- **Plan de gestion de mobilité :** Puisque les nœuds peuvent être mobiles, un système de gestion de mobilité doit exister. Un tel plan détecte et enregistre le mouvement du nœud capteur afin de l'aider à se localiser.
- **Plan de gestion des tâches :** 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 équilibre et ordonne les différentes tâches de captage de données dans une région spécifique.

I.6 Consommation et conservation d'énergie dans les RCSF

La conservation d'énergie est une préoccupation principale dans les réseaux de capteurs : les batteries ont une petite capacité et leur remplacement et recharge sont généralement difficiles voire impossible. Par conséquent, la consommation d'énergie d'un capteur doit être bien contrôlée afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter que lorsque les capteurs épuisent leurs batteries, la connectivité diminue et le réseau peut être devenu dysfonctionnel.

L'énergie dissipée par les réseaux de capteurs est répartie entre le traitement, la capture et la communication de données [18].

Energie de capture

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

Energie de traitement

L'énergie de traitement se divise en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

Energie de communication

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

La figure I.5 montre un modèle simple dans lequel l'émetteur dissipe de l'énergie pour faire fonctionner les appareils électroniques et l'amplificateur, et le récepteur dissipe de l'énergie pour faire fonctionner les appareils électroniques de radio.

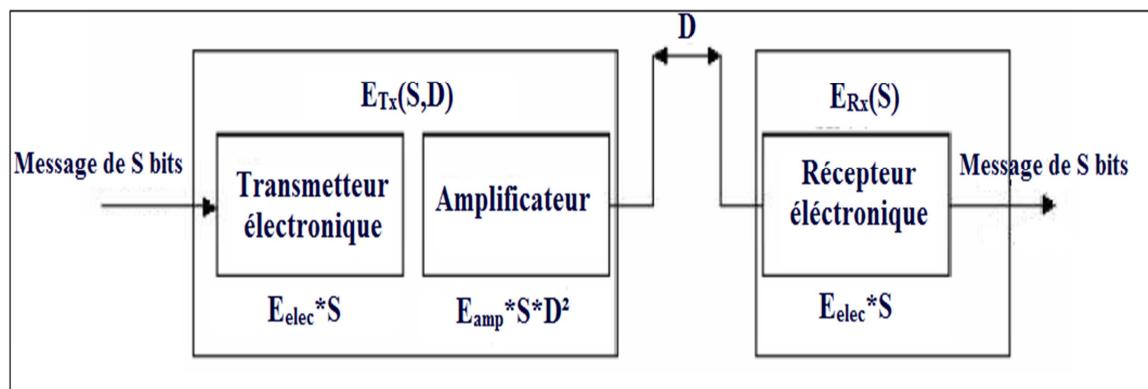


Figure.I.5 Modèle de consommation d'énergie

I.7 Applications des RCSFs [18]

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations, etc.) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes. Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de

traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc. Des exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines sont exposés ci-dessous [18].

I.7.1 Applications militaires

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

Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemis, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations). Des tests concluants ont déjà été réalisés dans ce domaine par l'armée américaine dans le désert de Californie.



Figure.I.6 Réseau de capteurs militaire

I.7.2 Applications à la sécurité

Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, pourraient être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton, sans alimentation électrique ou autres connexions filaires. Les capteurs doivent s'activer périodiquement et peuvent ainsi fonctionner durant des années, voire des décennies. Un réseau de capteurs de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur.

Déconnecter le système ne serait plus aussi simple, puisque il n'existe pas de point critique. La surveillance de voies ferrées pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains peut être une application intéressante des réseaux de capteurs. La protection des barrages pourrait être accomplie en y introduisant des capteurs. La détection de fuites d'eau permettrait d'éviter des dégâts. Les êtres humains sont conscients des risques et attaques qui les menacent. Du coup, ils mettent à disposition toutes les ressources humaines et financières nécessaires pour leur sécurité.

Cependant, des failles sont toujours présentes dans les mécanismes de sécurisation appliqués aujourd'hui, sans oublier leur coût très élevé. L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats.

I.7.3 Applications environnementales

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

Une grande quantité de capteurs peut être déployée en forêt ou dans un environnement de conservation de la faune afin de recueillir des informations diverses sur l'état du milieu naturel et sur les comportements de déplacement.

Par exemple, l'université de Pise en Italie a réalisé des réseaux de capteurs pour le contrôle des parcs naturels (feux, animaux,...). Il est ainsi possible "d'observer", sans déranger, des espèces animales difficiles à étudier dans leur environnement naturel et de proposer des solutions plus efficaces pour la conservation de la faune. Les éventuelles conséquences de la dispersion en masse des micro-capteurs dans l'environnement ont soulevé plusieurs inquiétudes.

En effet, chaque micro-capteur est doté d'une batterie qui contient des métaux nocifs. Néanmoins, le déploiement d'un million de capteurs de 1 millimètre cube chacun ne

représente qu'un volume total d'un litre. Même si tout ce volume était constitué de batteries, cela n'aurait pas des répercussions désastreuses sur l'environnement.



Figure.I.7 Applications environnementales

I.7.4 Applications médicales

On pourrait imaginer que dans le futur, la surveillance des fonctions vitales de l'être humain serait possible grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau.

Actuellement, des micro-caméras qui peuvent être avalées existent. Elles sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures. Les auteurs d'une récente étude, présentent des capteurs qui fonctionnent à l'intérieur du corps humain pour traiter certains types de maladies. Leur projet actuel est de créer une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue.

D'autres ambitieuses applications biomédicales sont aussi présentées, tel que : la surveillance du niveau de glucose, le monitoring des organes vitaux ou la détection de cancers. L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies.

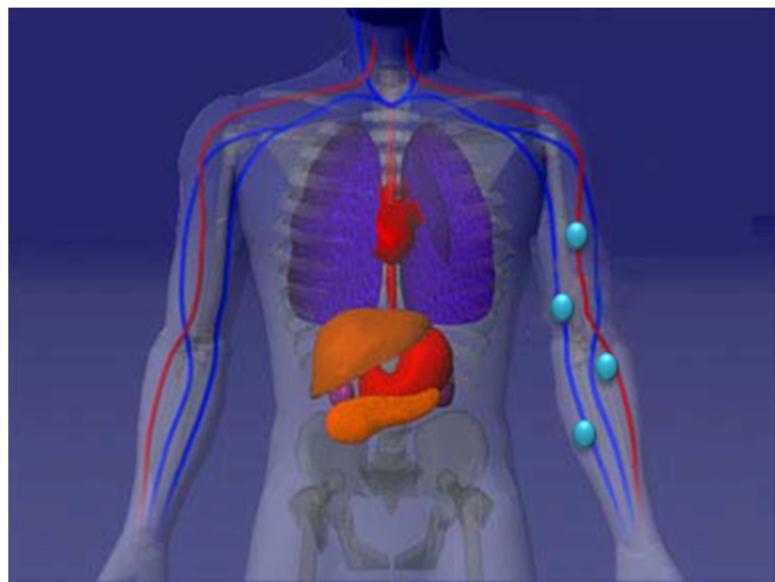


Figure.I.8 Ensemble de capteurs dans un corps

I.7.5 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la position actuelle du paquet.

Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.

Dans les immeubles, le système de climatisation peut être conçu en intégrant plusieurs micro-capteurs dans les tuiles du plancher et les meubles. Ainsi, la climatisation pourra être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué pourra aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait de réduire la demande mondiale en énergie réduisant du même coup les gaz à effet de serre.

Rien que pour les Etats-Unis, on estime cette économie à 55 milliards de dollars par an avec une diminution de 35 millions de tonnes des émissions de carbone dans l'air. Ainsi, dans un contexte mondial où le réchauffement de la planète devient une préoccupation grandissante, une telle conséquence environnementale serait un pas dans la bonne direction.

I.8 Facteurs et contraintes des RCSFs

La conception et la mise en place des RCSFs sont influencées par plusieurs contraintes qui peuvent être des contraintes conceptuelles ou matérielles. Ils servent de directives au développement des protocoles et des algorithmes utilisés dans les RCSFs [19].

I.8.1 Contraintes conceptuelles

- Passage à l'échelle

Le nombre de capteurs déployés sur une zone de captage peut atteindre plusieurs centaines de milliers voire plusieurs millions pour certaines applications. Le bon fonctionnement du réseau est conditionné par la définition d'un schéma de déploiement efficace respectant la propriété de haute densité. Le passage à l'échelle est défini comme la possibilité de déployer un grand nombre de nœuds sur une petite surface. Il est donné par la valeur calculant les distances entre les nœuds.

Le passage à l'échelle est utilisé pour connaître exactement la densité, le rayon d'émission et le nombre moyen de voisins d'un nœud donné. Ces informations sont d'une importance capitale pour bien modéliser le trafic avant toute implémentation réelle. A noter que le passage à l'échelle est plus critique dans les réseaux de capteurs que dans les autres réseaux sans fil.

- Tolérance aux pannes

Le fonctionnement d'un ou de plusieurs capteurs peut être interrompu au cours du cycle de vie du réseau. Les causes de ces défaillances sont multiples: manque en ressources énergétiques, dégâts matériels, interférences environnementales, transaction des nœuds, etc. Ces pannes ne doivent pas affecter le fonctionnement global du réseau.

La tolérance aux pannes se définit alors comme la capacité du réseau à continuer à fonctionner normalement sans interruption même après le dysfonctionnement d'un ou de plusieurs de ses nœuds capteurs.

- Environnement de déploiement

Dans la majorité des applications, les nœuds capteurs sont déployés dans des zones distantes, hostiles et sans aucune surveillance ni intervention humaine. Les capteurs doivent être conçus pour résister aux différentes conditions climatiques tels que la chaleur, l'humidité, le froid, la pression ... etc.

- Topologie du réseau

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

I.8.2 Contraintes matérielles [19]

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes qui peuvent être citées sont :

- Consommation stricte et mesurée de l'énergie.
- Un coût faible.
- Fonctionnement autonome des capteurs.
- S'adapter aux conditions de déploiement (environnementales, climatiques ...etc.)
- Une portée radio limitée.

I.8 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, la pile protocolaire des capteurs et leurs diverses applications. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau.

Nous nous intéressons, dans le prochain chapitre, à la présentation des routages déployés pour les réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre II Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

II.1. Introduction

Bien qu'un grand nombre d'applications mettent en jeu des RCSF's, ceux-ci ont plusieurs restrictions que ces applications doivent contourner. Par exemple, ils ont une faible puissance de calcul, une autonomie énergétique limitée et une bande passante réduite aux connexions sans fil entre capteurs.

Le routage de données dans les réseaux de capteurs sans fil est reconnu comme un domaine de recherche très actif vu les spécificités de ce nouveau type de réseau, où la propagation et la délivrance des données via une heuristique de préservation d'énergie et de prévention de perte de connectivité représentent la fonctionnalité la plus importante du réseau. Ce qui nous emmène à dire que l'énergie et la puissance de calcul limités des capteurs exigent une nouvelle génération de protocoles différente de celle des réseaux filaires et des réseaux ad hoc sans fil [20]. Cette différence s'explique par le fait que: Premièrement, l'impossibilité d'avoir un adressage global avec des tables de routage comme les réseaux basés sur l'IP, vu le nombre important et la densité de déploiement des capteurs. Deuxièmement, la communication est plus importante dans un seul sens: plusieurs capteurs envoient leurs données vers le puits (Sink). Troisièmement, les données transmises sont souvent très corrélées ce qui nécessite une exploitation spécifique pour optimiser la consommation de l'énergie et la bande passante. Quatrièmement, les capteurs sont limités en matière d'énergie, puissance de calcul et capacité de stockage; ce qui requiert une gestion efficace des ressources.

De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère indispensable. Dans ce chapitre, nous allons détailler l'ensemble des défis qu'il faut prendre en considération lors de la conception d'un protocole de routage pour les RCSFs, ainsi les différentes approches de routage dans les RCSFs en articulant les avantages et les inconvénients de chacune.

II.2. Les critères de conception d'un protocole de routage dans les RCSFs

Dans cette section, nous présentons un certain nombre de considérations qui sont indispensables pour la conception d'un protocole de routage pour les RCSFs. Comme les réseaux de capteurs imposent des fonctions spécifiques et des contraintes sur les ressources, leur efficacité et survivabilité dépendent considérablement de la qualité de leurs protocoles. Afin de concevoir un protocole de routage efficace, les facteurs détaillés ci-dessous doivent être pris en compte [21]. Cependant, la consommation d'énergie, la tolérance aux pannes, la

scalabilité et la capacité de communication, qui ont été déjà présentés dans le premier chapitre, vont être abordés ici de point de vue routage.

II.2.1. Déploiement des nœuds

Le déploiement des nœuds est une considération importante. Les réseaux de capteurs peuvent être installés d'une manière déterministe ou auto-organisée. Une fois le déploiement du réseau est déterministe, les nœuds sont placés manuellement d'une manière pré-déterminée. Le routage pourrait suivre les chemins pré-déterminés mais ce n'est pas toujours le cas. Quand le déploiement du réseau est auto-organisé, les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller. Un autre aspect de déploiement des nœuds est la nature des nœuds puits "sink" ainsi que les clusterheads (CHs) [21].

II.2.2. Consommation d'énergie

Les nœuds capteurs peuvent utiliser leur approvisionnement en énergie pour calculer et transmettre l'information dans un environnement sans fil. Pour cela, les techniques de conservation d'énergie lors de la communication et le calcul sont essentielles. En effet, la durée de vie d'un nœud capteur a une forte dépendance avec la durée de vie de la batterie [22]. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud joue un rôle dual comme un expéditeur et un routeur de données. Le mal-fonctionnement de quelques nœuds capteurs dû à la défaillance (à cause de la diminution totale d'énergie) peut causer les changements topologiques cruciaux et peut exiger le déplacement des paquets ainsi que la réorganisation du réseau [23].

II.2.3. Modèle de délivrance des données

Le modèle de renvoi des données captées constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Le modèle de délivrance des données peut être classé dans l'une de ces catégories : continu (time-driven), évènementiel (event-driven), orienté requête (query-driven) et hybride [25].

Le modèle de la livraison continu convient aux applications qui nécessitent des données capturées périodiquement. Dans les modèles évènementiels et orientés requête, les noeuds capteurs réagissent immédiatement et soudainement lors d'un changement rigoureux de valeur d'un attribut senti dû à l'occurrence de certains évènements ou requêtes produites par la BS. Ces modèles sont bien appropriés aux applications critiques du temps. Une combinaison des modèles précédents est également possible. Le protocole de routage est

fortement influencé par les modèles de données rapportées concernant la consommation d'énergie et la stabilité de route [23].

II.2.4. Hétérogénéité Nœud/Lien

Plusieurs études ont supposé qu'un réseau de capteurs est constitué de nœuds homogènes ayant les mêmes capacités en termes de calcul, de transmission et d'énergie disponible. Cependant, selon l'application, un nœud capteur peut avoir des rôles différents. L'existence d'un ensemble de capteurs hétérogènes soulève beaucoup de questions techniques liées au routage de données. Par exemple, quelques applications pourraient exiger un mélange de capteurs divers pour surveiller la température, la pression et l'humidité de l'environnement, détectant le mouvement par l'intermédiaire des signatures acoustiques, et capturant l'image ou le cheminement visuel des objets mobiles. Ces capteurs spéciaux peuvent être déployés indépendamment comme ils peuvent inclure des fonctionnalités différentes. Même le captage et la délivrance des données peuvent être produits par ces capteurs à différents taux. Par exemple, les protocoles hiérarchiques indiquent des noeuds CHs qui sont différents des nœuds capteurs normaux. Ces CHs peuvent être plus puissants que les autres nœuds capteurs en terme d'énergie, de bande passante et de mémoire. Par conséquence, ces CHs sont chargés de la transmission des données à la BS [23].

II.2.5. Tolérance aux pannes

Quelques nœuds capteurs peuvent être en panne ou être bloqués à cause du manque d'énergie, de dommage physique ou d'interférence environnementale. La défaillance des nœuds capteurs ne devrait pas affecter la tâche globale du réseau de capteurs. Si plusieurs nœuds sont en panne, les protocoles de routage doivent s'adapter à la formation de nouveaux liens et router les données collectées à la BS. Ceci peut exiger l'activation d'ajustement de puissance et de vitesse de transmission sur les liens existants pour réduire la consommation d'énergie, ou ré-router des paquets à travers des régions du réseau où plus d'énergie sera disponible [26].

II.2.6. Scalabilité

Le nombre de nœuds capteurs déployés dans une région de capture peut être dans l'ordre des centaines, des milliers ou plus. N'importe quel schéma de routage doit pouvoir travailler avec ce nombre énorme de nœuds capteurs. En outre, les protocoles de routage dans un réseau de capteurs doivent être assez scalables pour répondre aux événements dans l'environnement.

Jusqu'à ce qu'un évènement se produit, la plupart des capteurs peuvent rester dans l'état de sommeil avec quelques capteurs restants qui fournissent des données d'une qualité brute [23].

II.2.7. Dynamicité du réseau

Un réseau de capteurs se compose de cinq composants principaux. Sans l'un d'entre eux, les RCSFs ne fonctionnent pas, ou ils sont inutiles. Ces composants sont [27] :

1. Les nœuds capteurs qui sont des dispositifs pour recueillir et transmettre les données.
2. Le destinataire (ou observateur) qui est intéressé par l'information diffusée par les nœuds capteurs.
3. Le phénomène que les nœuds capteurs ont été déployés pour le surveiller.
4. L'infrastructure qui est la manière avec laquelle les nœuds capteurs sont actuellement déployés et reliés entre eux.
5. La pile protocolaire qui est responsable du routage et du transfert des données collectées en dehors du réseau.

Le rôle d'un RCSF est de créer un chemin en utilisant le protocole de routage et l'infrastructure existante entre un phénomène surveillé par un nœud capteur et un destinataire. Selon la mobilité des trois premiers composants du réseau (capteur, destinataire, phénomène) les réseaux de capteurs peuvent être classifiés comme dynamiques ou statiques. Dans les réseaux de capteurs statiques, les composants demeurent stationnaires. C'est habituellement le cas dans la plupart des réseaux de capteurs, par exemple un réseau de capteurs pour surveiller la température ou l'humidité d'une salle ou bien d'une région. Dans les réseaux de capteurs dynamiques, au moins l'un des composants est mobile.

II.2.8. Media de transmission

Dans un réseau de capteurs multi-sauts, les nœuds communicants sont liés par des liens sans fil. Les problèmes classiques liés au canal sans fil (par exemple : effacement, taux d'erreur élevé, etc.) peuvent également affecter le fonctionnement du réseau de capteurs. En général, la largeur de bande passante requise pour la transmission des données est basse, de l'ordre de 1-100kb/s. Les médias de transmission sont liés à la conception de la couche MAC. Une approche de conception de la couche MAC pour des réseaux de capteurs consiste à utiliser les protocoles basés sur TDMA qui conservent plus d'énergie par rapport aux protocoles basés sur la contention comme CSMA par exemple, IEEE 802.11 [28].

II.2.9. Connectivité

La densité élevée des nœuds dans les réseaux de capteurs exclut complètement l'isolement entre eux. Par conséquent, on s'attend à ce que des nœuds capteurs soient fortement reliés. Ceci, peut ne pas empêcher la topologie du réseau d'être variable et la taille du réseau d'être censive aux échecs des nœuds capteurs. En outre, la connectivité dépend probablement de la distribution aléatoire des nœuds [23].

II.2.10. Couverture

Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud capteur obtient une certaine vue de l'environnement. La vue de l'environnement d'un capteur donné est limitée dans la portée et dans l'exactitude, elle peut seulement couvrir un domaine physique limité de l'environnement. Par conséquence, la couverture d'une région est également un paramètre important dans la conception d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs [23].

II.2.11. Agrégation des données

Puisque les nœuds capteurs peuvent produire des données significatives et superflues, les paquets semblables des différents nœuds peuvent être agrégés de sorte que le nombre de transmissions soit réduit. L'agrégation de données est la combinaison des données de différentes sources selon une certaine fonction d'agrégation : suppression, minimum, maximum et moyenne, etc. Cette technique a été employée pour optimiser la consommation d'énergie lors de transfert des données dans un certain nombre de protocoles de routage. Des méthodes de traitement des signaux peuvent également être employées pour l'agrégation des données. Dans ce cas, elle est désignée sous le nom de la fusion de données où un nœud est capable de produire un signal de sortie en employant certaines techniques, telles que beamforming pour combiner les signaux entrants et réduire le bruit dans ces signaux [23].

II.2.12. Qualité de service

Dans quelques applications, les données devraient être fournies au cours de certaine période du moment où elles sont captées, sinon ils sont inutiles, et par conséquent, la latence définie pour la livraison des données est une autre condition pour les applications qui sont soumises sous des contraintes du temps. Cependant, dans plusieurs applications, la conservation d'énergie, qui est directement liée à la durée de vie du réseau est considérée relativement plus importante que la qualité des données envoyées. Pendant que l'énergie

s'épuise, le réseau exige de réduire la qualité des résultats afin de réduire la diminution d'énergie dans les nœuds, et par conséquent augmenter la durée de vie du réseau [23].

II.2.13. Capacité de communication

Les nœuds dans un réseau de capteurs ne sont pas nécessairement identiques. Ils peuvent être équipés de différents capteurs, et avoir des caractéristiques différentes. Ces particularités doivent être prises en considération pendant la conception d'un protocole de routage [29].

II.3. Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont déployés d'une manière dense dans un champ de captage proche ou à l'intérieur du phénomène capté. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi sauts sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant : la topologie du réseau, les opérations supportées et la destination des paquets transmis [29].

La topologie du réseau adopté, subdivise les solutions du routage en trois catégories principales: les protocoles centrés sur les données d'architecture plate, les protocoles hiérarchiques, et les protocoles de routage géographique.

En plus, si les opérations supportées sont prisent en charge, les solutions peuvent être classée en: basée multi-chemins (multipath-based), basée requêtes (query-based), basée négociation (negociation-based), basée sur les qualités du service (Qos-based) et basée sur la cohérence du traitement des données (coherent-based): Un traitement non-cohérent de données signifie que chaque nœud agrège ses données avant la transmission, par contre, un traitement cohérent signifie que les données sont transmises vers des nœuds spécifique dits « Aggregator » pour les opérations d'agrégation [20].

Le dernier critère de classification, qui est la destination des paquets transmis, distingue les solutions proposées en [30]: communication « Unicast », où la destination du message est un et un seul nœud, communication « Multicast », où les destinataires du message sont un sous ensemble définie du réseau et la communication en « Broadcast » où le message est destiné à l'ensemble du réseau.

Parmi les classifications mentionnées ci-dessus, celle selon la topologie est la plus répondu en littérature (enrichie par une quatrième classe basée sur QoS qui prend en charge

quelques qualités de communication en plus du routage de données) ; c'est cette classification que nous allons utiliser pour présenter les protocoles existants pour les RCSFs.

II.3.1. Classification selon la structure du réseau

Comme c'est illustré dans la figure suivante, les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories : protocoles plats, protocoles hiérarchiques et protocoles basés sur la localisation.

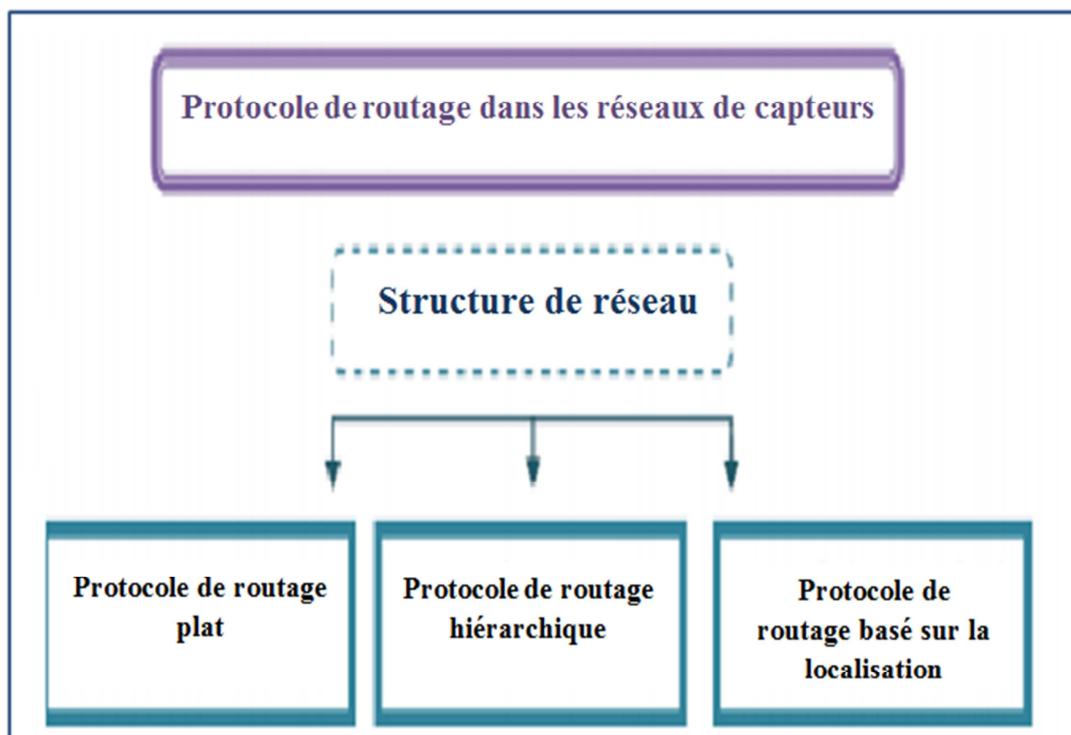


Figure.II.1 Classification des protocoles de routage selon la structure de réseau

II.3.1.1. Les protocoles à topologie plate

Dans une topologie plate, tous les nœuds possèdent le même rôle. Les nœuds sont semblables en termes de ressources.

Les protocoles à topologie plate, aussi dit, protocoles data-centric sont les premiers à être utiliser pour le routage sur les RCSFs; leur principe est simple, c'est la BS qui envoi des requêtes vers des zones spécifiques du réseau et attend l'arrivée des réponses des nœuds visés. Puisque les données sont demandées par les requêtes, un nommage basé sur les attributs est nécessaire pour permettre la correspondance entre requête envoyée par la BS et les données recensées au niveau des nœuds [31].

Cependant, les nœuds proches de la BS 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 message de contrôle [32].

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 habileté à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie.

Deux exemples phares de cette classe de protocoles sont SPIN et DD.

II.3.1.1.1. Le protocole SPIN

C'est un protocole de routage Data-centric qui utilise des techniques de négociation afin d'éliminer les problèmes de redondance de données dans le routage. Il 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 [32].

L'idée consiste à nommer les données en utilisant des descripteurs de haut niveau ou des méta-données. Avant la transmission, les méta-données sont échangées entre les capteurs par un mécanisme de publicité de données. Chaque nœud recevant de nouvelles données, les annonce à ses voisins et ceux intéressés récupèrent les données en envoyant une requête [33].

Les communications dans SPIN se font en trois étapes (voir figure II.2) avec trois types de messages: ADV/REQ/DATA.

- Un nœud voulant émettre une donnée commence par envoyer un paquet ADV. Ce paquet ADV consiste d'une méta-donnée sur les données à émettre. Les méta-données peuvent décrire plusieurs aspects comme le type des données et la localisation de son origine.
- Les nœuds qui reçoivent ce paquet vérifient si les données les intéressent. Si oui, ils répondent par un paquet REQ.
- Le nœud qui a initié la communication envoie alors un paquet DATA pour chaque réponse REQ reçue. Or, un nœud peut parfaitement ne pas répondre aux messages ADV, par exemple dans le but d'économiser son énergie.

Ensuite chaque nœud qui fait office de relais peut très bien agréger ses propres données aux données qui sont déjà contenues dans le paquet [34].

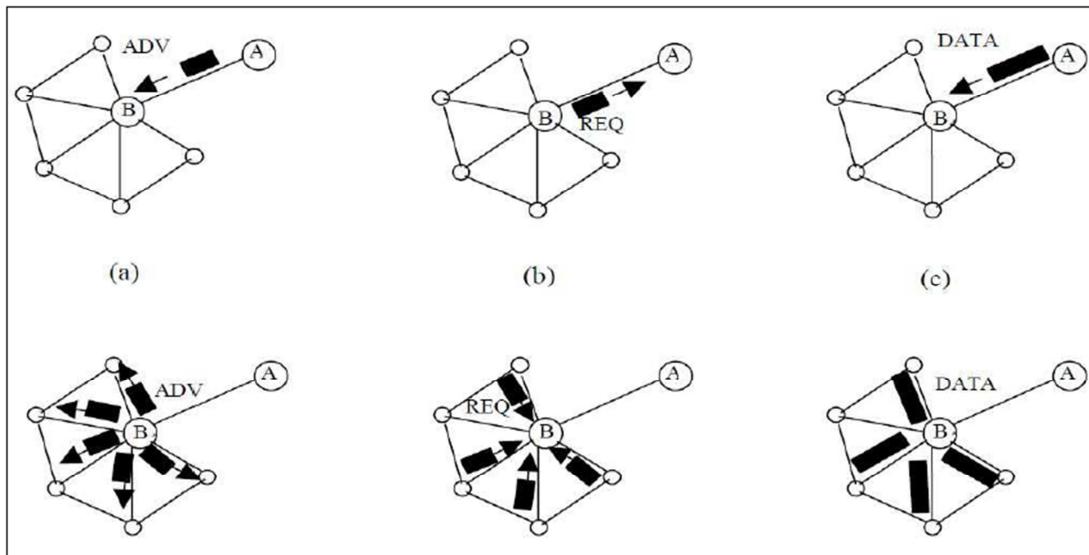


Figure.II.2 Le protocole SPIN

L'avantage principal de SPIN est l'élimination des envois redondants des données en utilisant la négociation. En plus, les changements de la topologie n'affectent pas les performances du protocole réseau car chaque nœud ne se base que sur les informations locales pour la prise de décision; il n'a besoin de communiquer des informations de contrôle qu'avec ses voisins directs.

Néanmoins, cet avantage peut générer un inconvénient majeur qui est le non garanti de la livraison des données dans le cas où le nœud ayant des données sollicitées est injoignable [35].

II.3.1.1.2. Le protocole DD

C'est un protocole de propagation de données, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. La diffusion dirigée suggère l'utilisation d'un schéma de nommage sous forme de pair « Attribue-Valeur » pour les requêtes et les données. Le principe de fonctionnement de ce protocole est le suivant:

Le nœud Sink commence à envoyer une requête d'intérêt « Interest » vers la destination à travers ses nœuds voisins pour démarrer une application bien déterminée, et chaque nœud recevant l'intérêt crée un gradient vers le noeud source de cet intérêt. A savoir que chaque nœud est défini à l'aide d'une liste de paires attribut-valeur comme le nom des objets,

l'intervalle, la durée, la zone géographique, etc...et qu'un gradient est un lien réponse de la part du voisin recevant l'intérêt et qui est caractérisé par le débit, la durée et la date d'expiration de données.

De cette manière, plusieurs routes reliant la BS à la source de données sont réalisées; puis la meilleure route sera renforcée pour éviter la redondance. La BS renvoie le message d'intérêt initial à travers la route choisie. Un intervalle plus petit renforce donc le nœud source sur ce chemin pour envoyer des données plus fréquemment [32].

La figure II.3 illustre les phases de fonctionnement de ce protocole.

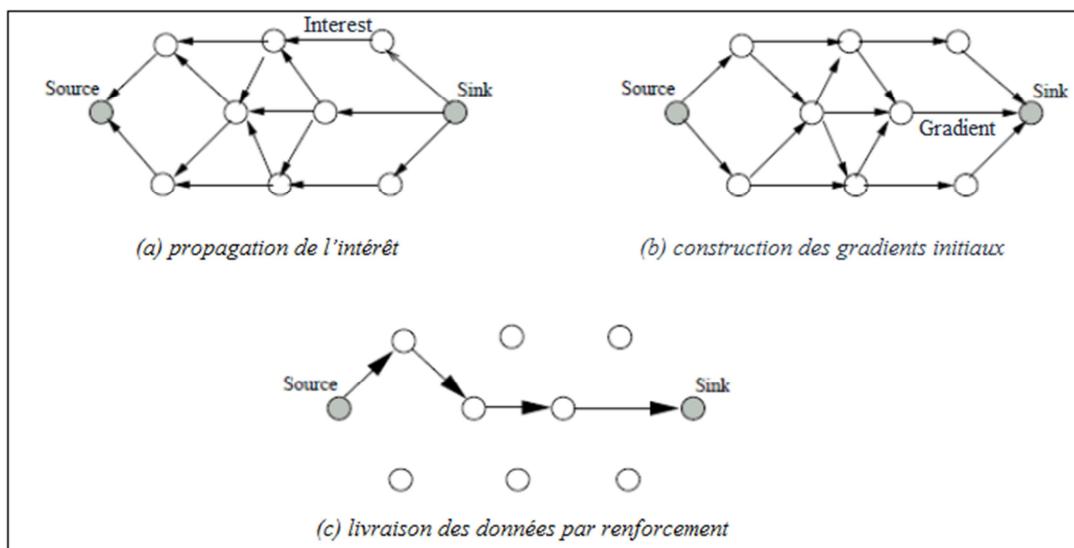


Figure.II.3 Fonctionnement du protocole DD

Si la route choisie échoue, une nouvelle ou une alternative doit être identifiée, puisque les données sont demandées par des requêtes.

En outre, cette méthode est coûteuse en termes de consommation d'énergie et ne représente pas un bon modèle pour les RCSFs.

II.3.1.2. Les protocoles géographiques

Les protocoles géographiques, aussi appelés les protocoles de routage basés sur la localisation utilisent les informations d'emplacement pour guider la découverte de routage et la transmission des données. Ils permettent la transmission directionnelle de l'information en évitant l'inondation d'information dans l'ensemble du réseau [35].

Dans ce type de protocoles, chaque nœud du réseau connaît sa position et celle de ses voisins. Le positionnement du nœud peut être obtenu en utilisant un système de géo-

positionnement tel que le GPS ou bien via des algorithmes de positionnement relatif [35]. Il peut donc calculer sa distance et celle de ses voisins à la destination et envoie l'information à son voisin qui le rapproche le plus de la destination finale.

Une estimation de la consommation d'énergie est réalisée au préalable pour désigner le chemin le plus rentable énergétiquement en obligeant les nœuds, qui ne sont pas sur le chemin du routage choisi, à entrer en mode veille.

Avec la topologie réseau basée sur des informations de localisation de nœuds, la gestion du réseau devient simple, mais le fait que chaque nœud doit connaître les emplacements des autres nœuds reste l'inconvénient majeur de ces protocoles [36].

Nous allons présenter, dans ce qui va suivre, deux solutions phares de ce type de routage et qui sont : le protocole GAF et le protocole GEAR.

II.3.1.2.1. Le protocole GAF [33]

C'est un protocole de routage basé sur la localisation des nœuds. Il est conçu principalement pour les réseaux mobiles ad hoc, mais peut être applicable aux réseaux de capteurs.

Ce protocole découpe le réseau en plusieurs zones virtuelles; chaque nœud est affecté à une zone donné selon ses coordonnées géographiques (en utilisant le GPS).

Les nœuds appartenant à la même zone sont considérés comme équivalents en coût de routage; ainsi, on choisit seulement un nœud de chaque zone pour router les données et les autres sont mis en mode veille pour conserver de l'énergie. De cette façon, la durée de vie du réseau est augmentée en fonction du nombre total des nœuds inactifs.

Dans GAF, le nœud peut se retrouver dans l'un des trois cas possibles:

- Mode découvert: pour déterminer ses voisins de zone
- Mode actif: s'il participe dans le routage de données
- Mode endormi: s'il ne participe pas au routage

Les transitions d'état de GAF sont représentées sur la figure II.4. Quel nœud va dormir et pendant combien de temps sont des paramètres qui dépendent de l'application et en conséquence les paramètres liés sont ajustés pendant le processus de routage.

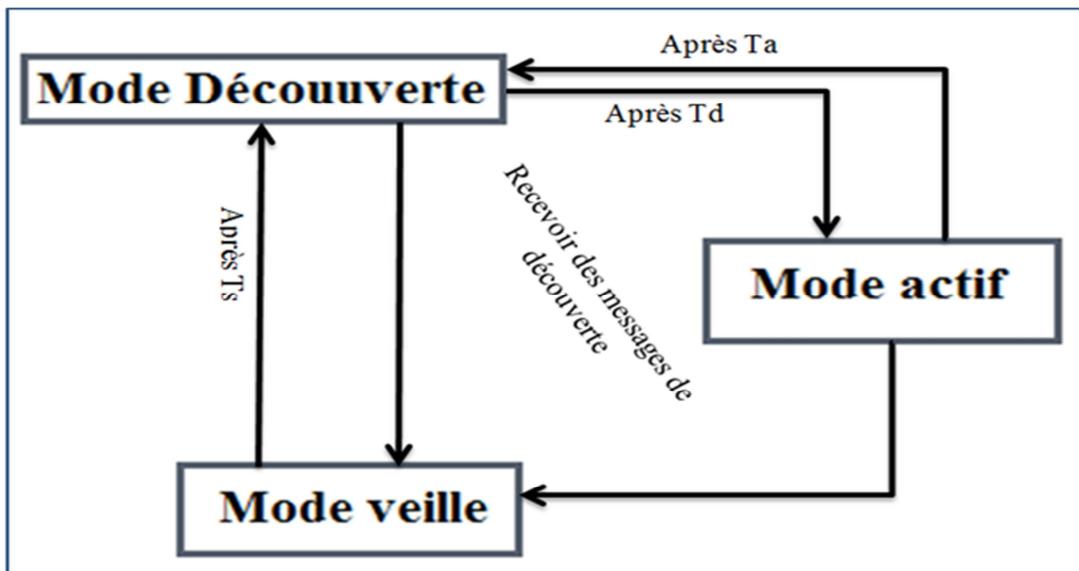


Figure.II.4 Transitions des états dans GAF

En effet, un seul nœud dans chaque grille reste à l'état actif en faisant passer les autres nœuds de la grille à l'état de veille pour une certaine période de temps tout en assurant la fidélité du routage.

Cependant, dans certains environnements où les nœuds sont fortement mobiles, la fidélité du routage pourrait être réduite si un nœud actif quitte la grille. Ainsi, le nombre de données perdues sera important. Pour supporter la mobilité, chaque nœud estime et diffuse le temps nécessaire pour quitter sa zone à ses voisins. Sur la base de ce temps ils estiment leurs temps de réveil pour choisir celui qui va prendre le relais parmi eux.

Nous pouvons dire que GAF est un protocole géographique et hiérarchique en même temps, car, à chaque instant chaque zone est représentée par un seul nœud pour router les données qui transitent via elle; à la différence, que ce représentant n'accomplit aucune tâche de fusion ou d'agrégation de données. En d'autres termes, les nœuds d'une zone constituent un groupe défini par leur positionnement dans une même zone délimitée physiquement.

Il faut noter que GAF ne prend pas en compte l'énergie du nœud lors du choix du représentant, ce qui peut générer des trous dans le réseau une fois que ce dernier épuise son énergie [37].

II.3.1.2.2. Le protocole GEAR

Le protocole GEAR est considéré comme une amélioration du protocole DD en se basant sur la géolocalisation et l'énergie des nœuds voisins.

Il découpe le réseau en régions dont l'idée principale est de limiter le nombre et la diffusion des intérêts vers des zones spécifiques au lieu de l'ensemble du réseau. De cette façon, une conservation d'énergie est obtenue par rapport à DD [35].

Avec le protocole GEAR, chaque nœud maintient le coût pour atteindre la destination en passant par ses voisins. Ce coût est divisé en deux parties : un coût estimé et un coût d'apprentissage. Le coût estimé est une combinaison de l'énergie résiduelle et la distance vers la destination. Le coût d'apprentissage consiste en un réajustement du premier coût en prenant en compte le routage à travers les trous qui peuvent apparaître sur le réseau. Un trou apparaît lorsqu'un nœud n'a aucun voisin sur un chemin vers le destinataire. S'il n'y a pas de trous, le coût estimé est égal au coût d'apprentissage. Le coût d'apprentissage est propagé dans le sens inverse chaque fois qu'un paquet est reçu par le destinataire pour ajuster le coût de la route pour les paquets qui vont suivre.

L'acheminement des paquets suit les étapes suivantes [32]:

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

II.3.1.3. Les protocoles hiérarchiques

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique.

Les protocoles hiérarchiques restructurent le réseau global en groupes dits CHss, chacun d'eux est constitué d'un chef appelé CH et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs du chef ou pas dont ils acheminent leurs messages à leur chef, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres CHs jusqu'à la BS. Un exemple de cette topologie est donné dans la figure ci-dessous.

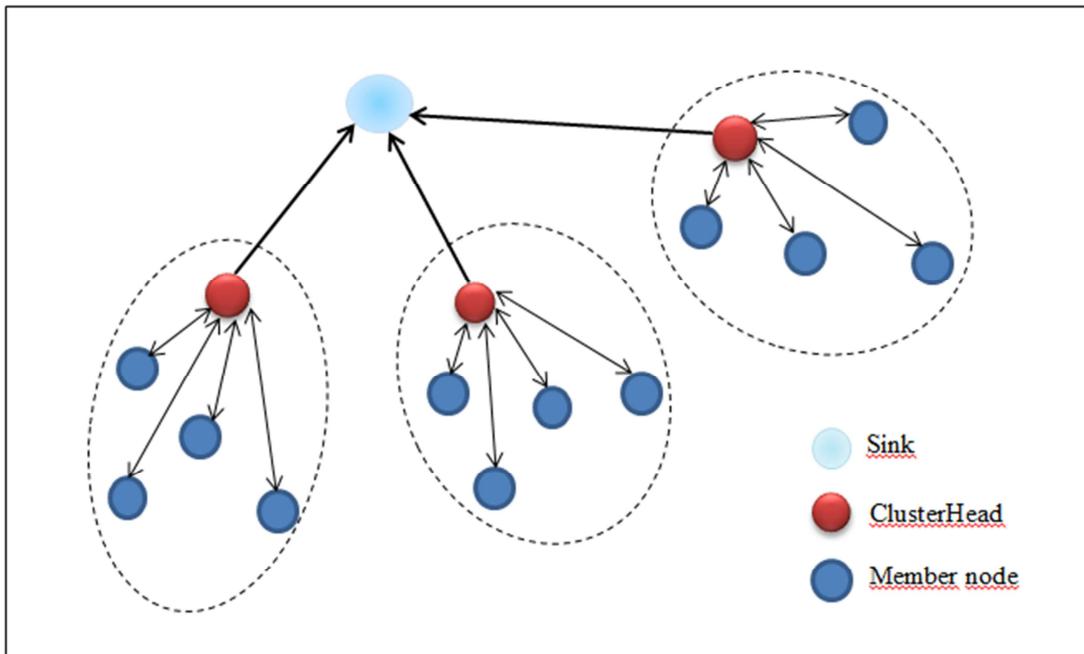


Figure.II.5 Routage hiérarchique

Le point fort de ce type de protocoles est l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis au sink, ce qui implique une meilleure économie d'énergie.

Le problème qui peut se poser dans cette topologie est la surcharge des CHs qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, CHs 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 [32].

Vu l'importance de ce type de protocoles dans la suite de notre travail, nous avons décidé de lui consacrer tout un chapitre pour mieux expliquer cette nouvelle approche de conception.

II.3.1.4. Les protocoles considérant les qualités de services

Dans cette catégorie, le protocole essaye de trouver un compromis entre la consommation de l'énergie et un ou plusieurs qualités de services lors de la livraison de données; ces qualités de services peuvent être le délai, la bande passante, ...etc. Un exemple de ce type de routage est le protocole SPEED. C'est un protocole géographique conçu pour les communications en temps réel sur les RCSFs. SPEED améliore le protocole géographique GEAR en prenant en compte le délai de livraison de données. Dans ce but, il estime le délai sur chaque saut du chemin de livraison en calculant le temps d'aller-retour d'un paquet (en retranchant le temps

de traitement sur le nœud destinataire). Le prochain saut est choisi parmi les nœuds proches du destinataire garantissant le meilleur délai.

L'avantage majeur de ce type de protocoles reste la prise en compte des délais de transmissions qui les rend très recommandés à des applications de surveillance (centres nucléaires, applications militaires, etc.). Or, l'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.

II.4. Métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage

Cette section présente les métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage dans les réseaux. Les trois premières sont applicables à toutes les architectures des réseaux statiques sans fil, tandis que les cinq postérieurs sont significatifs seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie.

II.4.1. Le nombre de sauts

C'est la métrique la plus typique qui est utilisée dans la gestion des réseaux. Elle représente le nombre des nœuds traversés par une transmission pendant le transfert des données depuis la source à la destination. L'inconvénient principal de cette métrique est qu'elle ne mesure pas ou ne tient pas en compte la largeur de la bande passante disponible entre les nœuds. Elle ignore les longs chemins (qui ont un nombre élevé de sauts) malgré qu'il y a des chemins parmi eux qui peuvent avoir une bande passante plus large que la bande passante des courts chemins [38].

II.4.2. Le temps de traverser un saut

Cette métrique mesure le temps d'aller-retour des requêtes envoyées aux nœuds voisins. Cette métrique peut être calculée en ayant un nœud qui va envoyer un paquet de requête avec une estampille "timestamped" à l'un de ses voisins chaque 500 ms. Quand le voisin reçoit le paquet, il le transmet de nouveau à l'expéditeur. En comparant le timestamped avec la durée du retour, la qualité du lien peut être évaluée. Naturellement, les résultats de ce test peuvent être altérés par le temps d'attente "Queuing Delay" ou la charge sur les deux nœuds [38].

II.4.3. La différence en temps d'arrivée de deux paquets par saut

Cette métrique est une amélioration de la métrique précédente car elle réduit le temps d'attente qui peut modifier les résultats. Cette métrique peut être calculée, en ayant un nœud examinateur qui va envoyer à l'un de ses voisins deux requêtes toutes les deux secondes, tel

que la première requête doit être envoyée avant la deuxième. Le récepteur calculera la différence de temps entre la réception des deux paquets et fera un rapport à l'expéditeur, ce dernier va maintenir ces différences de temps [38].

II.4.4. La notion du coût

"Cost awareness" représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie dans le routage dans laquelle nous essayons de prolonger au maximum la durée de vie d'un nœud. Les choix des opérations de routage que le nœud fera sont une fonction relative à son énergie de batterie restante. Afin d'utiliser "cost awareness" en tant qu'une métrique, on doit calculer la quantité d'énergie consommée pour chaque route imposée au réseau. Plus la consommation d'énergie est minime plus les tâches de routage peuvent être accomplies par le réseau/nœud avant qu'il soit défaillant [39].

II.4.5. La notion de puissance

"Power Awareness" représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie. Elle essaye de réduire au minimum l'énergie totale qui a été dépensée lors de l'envoi d'un message depuis sa source à sa destination [39]. Afin d'utiliser "power awareness" en tant qu'une métrique, on doit attribuer un poids, basé sur la distance, sur chaque saut possible entre les nœuds du réseau.

II.4.6. La notion de coût-puissance

Cette métrique est la combinaison des deux métriques précédentes. Elle vise à réduire au minimum l'énergie consommée dans tout le réseau et en même temps elle évite qu'un nœud ait une quantité d'énergie limitée [39].

II.4.7. Le temps du premier nœud à mourir

Cette métrique détermine le temps auquel le premier nœud épuise complètement son énergie [21]. Elle n'est pas concernée par la défaillance d'un nœud due à des raisons techniques.

II.4.8. Le temps du dernier nœud à mourir

C'est l'opposé exact de la métrique précédente, celle-ci enregistre le temps où le dernier nœud du réseau a consommé toute son énergie [21]. En d'autre terme, cette métrique mesure la durée de vie du réseau.

II.5. Conclusion

Les avancées récentes dans les réseaux de capteurs sans fil ont mené à nouveaux protocoles conçus spécifiquement pour des réseaux de capteurs dont la contrainte d'énergie est une considération essentielle. La conception de tel protocole de routage pour RCSF est influencée par plusieurs facteurs, ces facteurs doivent être dépassés pour atteindre la communication efficace dans les réseaux de capteurs. Cette dernière est mesurée par les métriques citées précédemment.

Dans ce chapitre, on a donné une vue globale sur les techniques de routage dans les réseaux de capteurs sans fil et qui ont comme un objectif commun le prolongement de la durée de vie du réseau. De façon générale, les techniques de routage sont classifiées selon la structure de réseau qui peut être plate, hiérarchiques, ou basée sur les informations de la localisation. En outre, ces techniques peuvent être classifiées selon les fonctions des protocoles, l'établissement de la route, ou l'initiateur de communication.

Nous proposons dans ce qui suit, le routage hiérarchique et nous citerons quelques protocoles que nous utiliserons lors de nos expérimentations et qui ont comme objectif le prolongement de la durée de vie du réseau.

Chapitre III Routage hiérarchique dans les RCSFs

III.1 Introduction

Les protocoles du routage hiérarchiques utilisent la méthode de clustering en se chargeant généralement d'établir des CHs et de définir la manière dont laquelle les nœuds décident quel CH à joindre. Le but principal de routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster particulier et en performant l'agrégation de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. La formation des clusters est typiquement basée sur l'énergie réservée dans les nœuds capteurs et de la proximité de ceux-ci au CH [22].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons particulièrement à la classe des protocoles hiérarchiques en présentant les deux grandes approches qui sont dérivées de ce type de protocoles, les différentes caractéristiques de ces derniers et enfin, nous exposons le protocole LEACH qui construit les clusters de manière complètement distribuée, le protocole LEACH-C, une variante de LEACH qui utilise une architecture centralisée pour choisir les CHs tout en impliquant la BS et l'information de localisation des capteurs et le protocole PEGASIS, une version améliorée du protocole LEACH dont il forme une chaîne entre les nœuds de sorte que les nœuds reçoivent et communiquent juste des données des nœuds voisins.

III.2 Approches dérivées des protocoles hiérarchiques

Dans les réseaux hiérarchiques, des nœuds capteurs sont construits et gérés par les nœuds maîtres appelés CHs. Il existe deux configurations possibles pour ces ensembles construits. Dans la première configuration, les membres d'un ensemble ne communiquent qu'avec leurs CH, en obtenant ainsi un modèle basé sur les groupes. Dans la seconde, ils construisent des listes et les membres d'un ensemble utilisent d'autres nœuds comme passerelles appelés leaders pour transmettre leurs données à leurs chefs en obtenant ainsi un modèle basé sur les chaînes comme le montre la figure III.1.

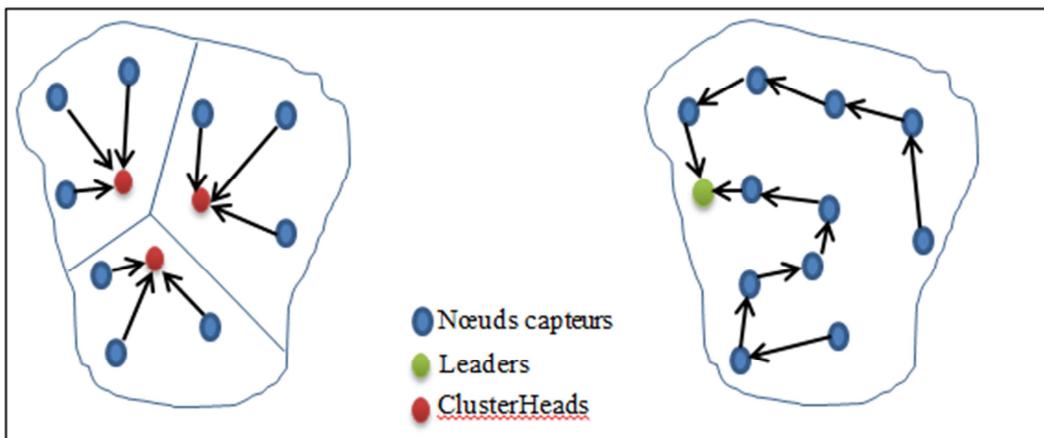


Figure III.1 Configurations pour les RCSF découpés

III.3 Caractéristiques d'un protocole hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches que nous pouvons classer selon :

III.3.1 L'algorithme de clustering utilisé

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, un classement en trois types de ces algorithmes est proposé dans [40] en se basant sur le type d'algorithme de contrôle exécuté :

- **Centralisé** : l'algorithme est exécuté sur le nœud qui a une vue globale du réseau, généralement, au niveau du sink. Ce type d'algorithme est peu utilisé à cause de l'overhead c'est-à-dire, le surcoût, généré suite aux transmissions exécutées pour pouvoir garder la vue globale du réseau et la dynamique de la topologie qui fait que cette vue soit très variable. La vue obtenue par un nœud peut ne plus être valide à l'instant où le nœud la récupère à cause de pannes et des imprévisibles déconnexions.
- **Distribué** : l'algorithme est exécuté en coopération au niveau de chaque nœud du réseau. La synchronisation des tâches de contrôle est obtenue en échangeant des messages de contrôle. Ce type d'algorithme minimise la communication relative à la sauvegarde de la vue globale du réseau, car chaque nœud décide, indépendamment des autres, son rôle et fait connaître sa décision par l'envoi de message. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes dépend de la taille et du nombre de ces messages de synchronisation.
- **Géographique** : l'algorithme de la tâche de contrôle à exécuter par un nœud dépend de sa position géographique.

III.3.2 La réélection des CHs

Par sa fonction, le nœud CH consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le CH coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour pallier à ce problème, une rotation de ce rôle de CH est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement ou bien en fonction de la consommation de l'énergie du nœud CH [40].

III.3.3 La nature des clusters générés

Les algorithmes de Clustering utilisés peuvent générer deux types de cluster: des clusters disjoints et des clusters interconnectés. Dans le premier type, un nœud ne peut appartenir qu'à un et un seul cluster à la fois (le cas le plus fréquent); sauf que pour des applications spécifiques telles que le routage inter-cluster, la localisation et la synchronisation des nœuds; les clusters interconnectés sont utilisés. Ce type de clustering permet aux nœuds d'appartenir à un ou plusieurs clusters à la fois.

III.3.4 La communication intra-cluster

La communication entre le nœud CH et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts. Dans le cas d'une communication direct (en un saut), les paquets de données sont envoyés directement au CH. Cela suppose que les nœuds membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données. Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance, entre le CH et les nœuds, est grande. Pour réduire la consommation de l'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée. Dans ce cas, chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH. Des communications de type « Unicast » sont souvent utilisées pour réduire le nombre de collisions. On trouve aussi des techniques employées au niveau MAC pour garantir un accès équitable et sans erreurs, à savoir, CDMA en utilisant un code pour chaque cluster, TDMA en allouant pour chaque nœud du cluster un temps spécifique, dit frame, pour envoyer ses données, ou bien, FDMA où chaque nœud utilise une fréquence spécifique pour l'envoi de données[41].

III.3.5 La communication inter-cluster

Les CHs communiquent avec la (les) station(s) de base soit directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des nœuds Gateway. Ces nœuds peuvent

être des CHs ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la communication en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalabilité du réseau.

III.3.6 Le niveau d'agrégation de données

Selon le type des capteurs utilisés, l'agrégation de données peut se faire à chaque nœud du réseau ou bien uniquement au niveau des CHs. L'agrégation des données permet de réduire la taille des données échangées entre les nœuds, et par conséquence réduire l'énergie dépensée. Plusieurs techniques d'agrégation sont utilisées à savoir des fonctions élémentaires comme la somme, la moyenne, l'écart type,...etc. ou bien des fonctions plus complexes spécifiques aux applications utilisées.

III.4 Exemples des protocoles de routage hiérarchique

III.4.1 Le protocole de routage LEACH

LEACH est considéré comme étant le premier protocole de routage hiérarchique basé sur les clusters qui était proposé par Heinzelman et al. comme étant l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs sans fil.

L'idée est de former des clusters de nœuds capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des CHs locaux pour atteindre la destination en optimisant la consommation d'énergie [42].

III.4.1.1 Architecture de communication de LEACH

L'architecture de communication de LEACH consiste, de façon similaire aux réseaux cellulaires, à former des cellules basées sur l'amplitude du signal, et utiliser les têtes de cellules comme routeurs vers le nœud puits. Ces cellules sont appelées clusters, quant aux têtes, les CHs. Les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster, en fonction de l'état de sa batterie. Puis, ils sont utilisés comme relais pour atteindre le puits suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds de réseau [18].

Un nœud capteur décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus. A la formation des groupes. Comme montre la figure III.2, tous les nœuds ordinaires transmettent leurs données à leur CH qui les agrègent et transmettent, à leur tour, à la BS selon une communication unicast (à un seul saut).

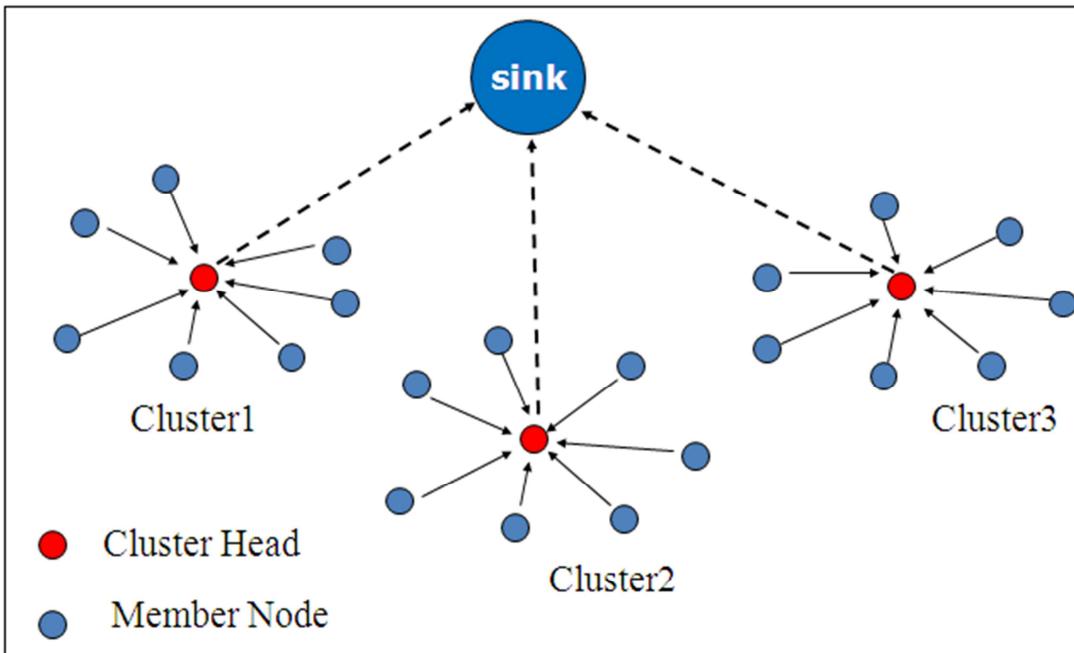


Figure III.2 Architecture de communication du protocole LEACH

Les CHs ont pour mission d'assurer les fonctions les plus coûteuses en énergie, à savoir la communication avec le nœud puits qui est supposé éloigné, ainsi que tous les traitements de données (agrégation, fusion et transmission de données) afin de réduire la quantité des données transmises. Ce dispositif permet d'économiser l'énergie puisque les transmissions sont uniquement assurées par les CHs plutôt que par tous les nœuds du réseau. Par conséquent, LEACH réalise une réduction significative de la dissipation d'énergie [43].

III.4.1.2 Principe de fonctionnement de LEACH

Le protocole LEACH prend pour hypothèse l'égalité des énergies résiduelles des capteurs lors du démarrage de fonctionnement du réseau. La vie du réseau est alors segmentée en rounds caractérisées par un choix de CH.

Or, Chaque round est constitué de deux phases : la phase set-up qui est une phase d'initialisation et la phase steady-state, une phase de transmission.

III.4.1.2.1 La phase d'initialisation

La phase set-up est composée, à son tour, de trois sous-phases: d'annonce, d'organisation des groupes et enfin d'ordonnancement :

Phase d'annonce

Avant de lancer cette phase, nous désirons avoir un certain nombre de CH. Ce nombre, que l'on note K , est fixe et il est inchangé durant tous les rounds. Nous estimons que le pourcentage optimal du nombre de CHs désirés devrait être de 5% à 15% du nombre total de

nœuds [18]. Si ce pourcentage n'est pas respecté, cela mènera à une grande dissipation d'énergie dans le réseau. En effet, si le nombre de CHs est très élevé, nous posséderons un nombre important des nœuds CHs qui se consacrent aux tâches très couteuses en ressources énergétiques. Or, nous aurons une dissipation d'énergie considérable dans le réseau. De plus, si le nombre de CHs est très petit, ces derniers vont gérer des groupes de grandes tailles. En conséquence, ces CHs s'épuiseront rapidement à cause de travail important qui leur est demandé.

Cette phase commence par l'annonce du nouveau round par le nœud puits, et, par la prise de décision locale d'un nœud pour devenir CH avec une certaine probabilité $P_i(t)$ au début du round $r+1$ qui commence à l'instant t . Chaque nœud i génère un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à $P_i(t)$, le nœud deviendra CH durant le round $r+1$. $P_i(t)$ est calculé en fonction de K et de round r [44]:

$$\text{Nombre CH} = \sum_{i=1}^N P_i(t) = K$$

Où N est le nombre total de nœuds dans le réseau. Si on a N nœuds et K CHs, alors, il faudra N/K rounds durant lesquels un nœud doit être élu seulement une seule fois autant que CH avant que le round soit réinitialisé à 0. Donc, la probabilité de devenir CH pour chaque nœud i est:

$$P_i(t) = \frac{\text{le nombre de CH désirés}}{\text{le nombre de noeuds qu n'ont pas encore été élus CH durant les r rounds précédents}}$$

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{K}{N - K * (r \bmod \frac{N}{K})} & Ci(t) = 1 \\ 1 & Ci(t) = 0 \end{cases}$$

Avec $Ci(t)$: l'éligibilité de nœud d'être CH à l'instant t

Où $Ci(t)$ égal à 0 si le nœud i a déjà été CH durant l'un des rounds précédents, et, il est égal à 1 dans le cas contraire. Donc, seuls les nœuds qui n'ont pas encore été CH, ont vraisemblablement une énergie résiduelle suffisante que les autres et ils pourront être choisis.

Phase d'organisation des clusters

Après qu'un nœud soit élu CH, il doit informer les autres nœuds capteurs de son nouveau rang dans le round courant. Pour cela, un message d'avertissement « ADV » contenant l'identificateur du CH est diffusé à tous les autres nœuds en utilisant le protocole MAC CSMA pour éviter les collisions entre les CHs. La diffusion permet de s'assurer que tous les

nœuds ont reçu le message. Par ailleurs, elle permet de garantir que les nœuds appartiennent au CH qui requiert le minimum d'énergie pour la communication. La décision est basée donc sur l'amplitude du signal reçu; le CH ayant le signal le plus fort, c'est-à-dire le plus proche, sera choisi. En cas d'égalité des signaux, les nœuds ordinaires choisissent aléatoirement leur CH [44]. Chaque membre informe son CH de sa décision. Une fois que le CH ait reçu la demande, il lui envoie un message d'acquittement « Join- REQ ».

Phase d'ordonnancement

Après la formation des groupes, chaque CH agit comme un centre de commande local pour coordonner les transmissions des données au sein de son groupe. Il crée un ordonnanceur TDMA et assigne à chaque nœud membre un slot de temps durant lequel il peut transmettre ses données. L'ensemble des slots assignés aux nœuds d'un groupe est appelé frame. La durée de chaque frame diffère selon le nombre de membres du groupe. Par ailleurs, afin de minimiser les interférences entre les transmissions dans des groupes adjacents, chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA. Il le transmet par la suite à ses membres afin de l'utiliser pour leurs transmissions [45].

III.4.1.2.2 La phase de transmission

Dans cette deuxième phase, le transfert de données vers la BS aura lieu. En utilisant l'ordonnanceur TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leurs interfaces de communication en dehors de leurs slots afin d'économiser leur énergie. Ces données sont ensuite agrégées par les CH qui les fusionnent et les compressent, et, envoient le résultat final au Sink.

Après un certain temps prédéterminé, le réseau va passer à un nouveau round. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les nœuds du réseau seront élus CH, une seule fois, tout au long des rounds précédents. Dans ce cas, le round est réinitialisé à 0.

III.4.1.3 Avantages et inconvénients de LEACH

Bien que LEACH puisse augmenter la durée de vie du réseau en manipulant ses ressources tout en respectant plusieurs contraintes telle que la consommation d'énergie, il présente certaines limitations. Dans ce qui suit, nous citons quelques avantages et inconvénients du protocole LEACH.

III.4.1.3.1 Avantages

Le protocole LEACH présente les avantages suivants:

- **Algorithme distribué :** l'auto-configuration des clusters se fait indépendamment de la BS.
- **Rotation des rôles de chefs de groupes:** les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster ce qui empêche la forte consommation d'énergie pour la transmission des données.
- **Faible énergie pour l'accès au média:** Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CHs afin d'optimiser l'utilisation du média de communication en la faisant gérer localement par un CH pour minimiser les interférences et les collisions.
- **Agrégations des données:** Les CHs compressent les données arrivant de leurs membres, et envoient un paquet d'agrégation au nœud puits afin de réduire la quantité d'informations qui doit lui être transmise. Cela permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, de simplifier la gestion du réseau, d'optimiser les dépenses d'énergie et enfin de rendre le réseau plus évolutif.

III.4.1.3.2 Inconvénients

- **Absence des CHs:** On pourra ne pas avoir des CHs durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité $P_i(t)$.
- **La distance entre le CH et les autres nœuds:** Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.
- **Diminution de l'énergie des nœuds:** cette diminution est due à l'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-sauts.
- **La rotation des CHs:** c'est une méthode qui n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CHs, et qui réduit le gain d'énergie initial.
- **La sécurisation:** le protocole LEACH n'est pas sécurisé. Aucun mécanisme de sécurité n'est intégré dans ce protocole. Ainsi, il est très vulnérable même aux simples attaques. Donc, un attaquant peut facilement monopoliser le réseau et induit à son disfonctionnement.

III.4.2 Le protocole de routage LEACH-C

C'est une variante de LEACH qui a été proposée par Heinzelman et al. Afin d'améliorer les performances de LEACH. Cette variante utilise une architecture centralisée pour choisir les CHs tout en impliquant la BS et l'information de localisation des capteurs.

Les informations de localisation et la valeur d'énergie résiduelle de tous les nœuds sera envoyée à la BS au début de chaque itération. Après l'acquittement de ces informations, la BS doit veiller à ce que la charge de l'énergie soit également réparti entre tous les nœuds. Pour cela, la BS calcule la valeur d'énergie moyenne de tous les nœuds et détermine que les nœuds ont une énergie résiduelle plus élevée que la moyenne. Une fois que la BS formera les clusters avec leur CHs, elle diffuse un message contenant l'ID des CHs pour chaque nœud. Si l'ID du nœud correspond au même ID qu'il a reçu, le nœud est un CH sinon, le nœud établira le contact avec le CH relatif et transférera des données à ce dernier lors son slot.

Cependant, elle augmente considérablement l'overhead du réseau puisque tous les capteurs devront envoyer leurs informations de localisation à la BS en même temps pendant chaque phase d'élection de CH. Plusieurs travaux présentés dans la littérature ont prouvé qu'une telle architecture centralisée ne supporte pas le passage à l'échelle et est plus particulièrement appropriée à des réseaux de petite taille. Ensuite, le fonctionnement continue de la même manière que pour LEACH. [46].

III.4.3 Le protocole de routage PEGASIS [18]

Le protocole PEGASIS, proposé par Lindsey et Raghavendra en 2002, est un protocole basé sur les chaînes. L'idée de base du protocole est que, dans le but de prolonger la durée de vie du réseau, les nœuds vont être organisés de telle sorte à ce qu'ils forment une chaîne, n'auront ainsi besoin de communiquer qu'avec seulement leurs voisins les plus proches.

Pour localiser le voisin le plus proche, chaque nœud utilise la force du signal pour mesurer la distance vers tous les nœuds voisins, et ajuster par la suite la force du signal de telle sorte que seul un nœud peut être entendu. La forme agréée des données sera envoyée à la BS par n'importe quel nœud dans la chaîne et les nœuds dans cette dernière vont se prendre en relais dans la transmission à la BS.

Donc, pour communiquer avec le puits, le processus est organisé en rounds; au cours de chaque round un seul nœud, appelé le leader, est autorisé à communiquer avec le puits directement et qui est un nœud représentatif d'une chaîne déjà présélectionné. Ce privilège est accordé à l'ensemble des nœuds du réseau à tour de rôle. Les données collectées sont transmises d'un nœud à un autre qui les agrège jusqu'à ce qu'elles arrivent au leader qui les transmet à la BS [18].

Par conséquent, PEGASIS a deux principaux objectifs. D'abord, augmenter la durée de vie de chaque nœud en employant des techniques de collaboration et augmenter par conséquent la durée de vie du réseau. En second lieu, permettre seulement la coordination locale entre les

nœuds voisins de sorte que la largeur de bande consommée dans la communication soit réduite.

III.4.3.1 La construction des chaînes

Les nœuds vont être organisés de sorte qu'ils forment une chaîne, qui peut être soit calculée d'une façon centralisée par la BS et émise à tous les nœuds, ou accomplie par les nœuds capteurs eux-mêmes en employant un algorithme avide (greedy algorithm). Si la chaîne est calculée par les nœuds capteurs, ils peuvent d'abord obtenir toutes les données sur l'emplacement des nœuds capteurs et calculent localement la chaîne en utilisant le même algorithme avide. Puisque tous les nœuds ont les mêmes données d'emplacement et exécutent le même algorithme, ils vont tous produire le même résultat.

Pour construire la chaîne, PEGASIS commence avec le nœud le plus éloigné de la BS. Le voisin le plus proche de ce nœud sera le nœud suivant dans la chaîne. Les voisins successifs sont sélectionnés de cette manière parmi les nœuds non visités afin de former la chaîne de nœuds.

L'algorithme commence par le nœud le plus lointain pour s'assurer que les nœuds les plus loin de la BS ont des voisins proches à mesure que, dans l'algorithme avide, les distances voisines augmenteront graduellement puisque des nœuds déjà présents sur la chaîne ne peuvent pas être revisités.

La figure III.3 montre la construction de chaîne en utilisant l'algorithme avide où le nœud n_0 se joint au nœud n_1 qui se joint à son tour au nœud n_2 , et le nœud n_2 se joint au nœud n_3 . Quand un nœud meurt, la chaîne est reconstruite de la même manière pour dévier le nœud mort.

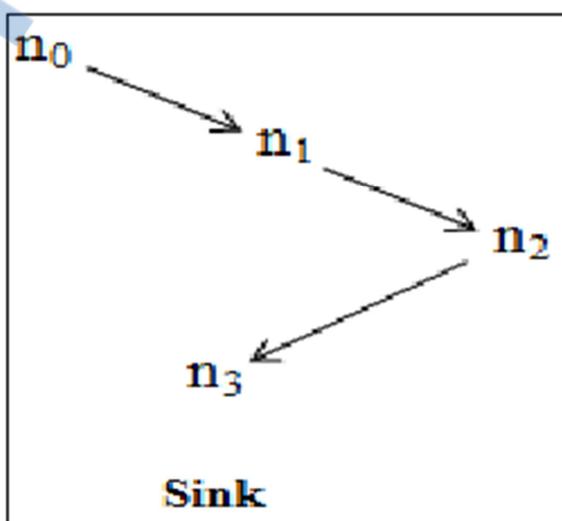


Figure III.3 Construction de chaînes en utilisant l'algorithme avide

III.4.3.2 Déroulement de l'algorithme

Pour collecter les données des nœuds capteurs dans chaque cycle, chaque nœud reçoit les données d'un voisin, les fusionne avec les siennes, et transmet à un autre voisin dans la chaîne. À noter que ce nœud, noté i , serait à une position aléatoire sur la chaîne que nous l'appelons j . Les nœuds se relient dans la transmission à la BS et PEGASIS va utiliser le nombre $i \bmod N$ sachant que N représente le nombre de nœuds afin de transmettre à la BS dans le cycle i . Ainsi, le leader dans chaque cycle de communication sera à une position aléatoire sur la chaîne.

Chaque cycle de collecte de données peut être lancé par la BS avec un signal de balise qui synchronisera tous les nœuds capteurs. Puisque tous les nœuds connaissent leurs positions sur la chaîne, PEGASIS peut employer une approche de slot de temps, TDMA, pour la transmission des données. Dans le $i^{\text{ème}}$ cycle de collecte de données, le nœud $(i-1)$ sera leader.

Le nœud n_0 transmettra ses données au nœud n_1 dans le premier slot, n_1 fusionne et transmet les données dans le deuxième slot, et ainsi de suite jusqu'à ce que le nœud leader soit atteint. Dans les slots suivants, les transmissions de données ont lieu depuis le nœud n_{n-1} et se déplacent vers le nœud leader de l'extrémité de la chaîne. Finalement, dans le $n^{\text{ème}}$ slot, le leader transmet les données à la BS.

Alternativement, dans un cycle donné, PEGASIS peut utiliser une approche de déplacement de jeton à contrôle simple lancée par le leader pour commencer la transmission des données des extrémités de la chaîne. Le coût est très petit du fait que la taille du jeton est très petite. La figure III.4 montre un exemple de déplacement de jeton.

Le nœud n_2 est le leader et va passer le jeton le long de la chaîne commençant au nœud n_0 . Le nœud n_0 passera ses données au nœud n_2 . Après que le nœud n_2 ait reçu les données du nœud n_1 , il passera le jeton au nœud n_4 , et le nœud n_4 passera ses données au nœud n_2 avec fusion des données le long de la chaîne.

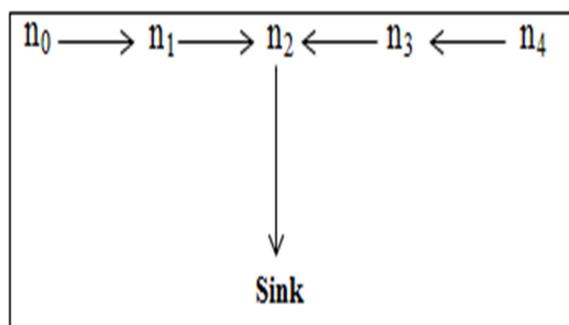


Figure III.4 Approche de déplacement de jeton

PEGASIS exécute la fusion de données à chaque nœud excepté les nœuds de fin de chaîne. Chaque nœud va fusionner les données de ses voisins avec les siennes afin de générer un paquet simple et les transmet par la suite à son autre voisin (s'il en a deux). Dans l'exemple précédent, Le nœud n_0 transfère ses données au nœud n_1 , qui agrège ses propres données avec celles du nœud n_0 , puis les communique au nœud leader n_2 . Le nœud n_2 passe le jeton au nœud n_4 qui transmet ses données au nœud n_3 . Ce dernier agrège éventuellement ses données avec celles du nœud n_4 et les transmet à son tour au nœud n_2 , qui attend pour recevoir des données de ses voisins et puis les agrège avec ses propres données et transmet un message unique à la BS. Ainsi, dans PEGASIS, chaque nœud va recevoir et transmettre un paquet de données dans chaque cycle et sera le leader une fois chaque N cycles. En addition, les nœuds reçoivent et transmettent des paquets de contrôle de jeton très petits.

III.4.3.3 Avantages et inconvénients du protocole PEGASIS

Bien que le protocole PEGASIS engendre beaucoup d'avantages en ce qu'il offre comme bonne manipulation de ressources du réseau en respectant plusieurs contraintes telle que la consommation d'énergie, un nombre d'inconvénients restent plus ou moins apparents.

Dans la suite, nous mentionnons quelques avantages et inconvénients de ce protocole.

III.4.3.3.1 Avantages

- Utilisation d'agrégation des données qui minimise le nombre des transmissions et qui conserve l'énergie.
- Elimination de la phase de la construction des clusters pour chaque round qui génère une surconsommation d'énergie importante.

III.4.3.3.2 Inconvénients

- Bien que l'overhead du clustering soit évité, PEGASIS exige toujours un ajustement dynamique de la topologie puisqu'un nœud devrait connaître le niveau d'énergie de ses voisins avant de relayer ses données.
- Ce protocole atteint rapidement ses limites de fonctionnement dans le cadre des réseaux fortement denses.
- Le délai de livraison des données est très important lorsque la chaîne formée est très longue. Et, le nœud qui transmet les données vers le puits peut devenir un point de congestion du réseau [33].

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé du routage hiérarchique qui vise à rendre les protocoles plus favorables au passage à l'échelle tout en restant plus économique en consommation d'énergie. Et cela, afin de couvrir une zone de captage plus large.

Ainsi, nous avons identifié le protocole LEACH et sa variante, LEACH-C qui suivent une approche basée sur les groupes et le protocole PEGASIS qui est un protocole basé sur les chaînes.

Cela, nous permet de passer au dernier chapitre qui est le cœur de notre PFE, la simulation des deux protocoles, l'un basé sur les groupes qui est LEACH et l'autre basé sur les chaînes qui est PEGASIS en essayant de comparer les résultats en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau.

Chapitre VI Evaluation des performances à travers la simulation

VI.1 Introduction

Le prolongement de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil est devenu un vrai défi puisque les capteurs sont dotés de batteries à énergie limitée. De plus, leur recharge ou leur remplacement reste impossible lorsque les capteurs sont déployés dans des environnements hostiles et inaccessibles. De ce fait, la durée de vie du réseau dépend donc de la durée de vie de leur batterie. Autrement dit, elle est étroitement liée à la façon de consommer l'énergie.

C'est pourquoi, les protocoles permettant d'économiser l'énergie occupent, aujourd'hui, un axe important de recherche dans ce domaine.

Dans ce chapitre, nous allons présenter puis analyser les résultats des simulations et des expérimentations obtenus lors de l'implémentation de trois protocoles de routage : LEACH et LEACH-C qui sont basé sur une approche de clustering et PEGASIS qui est basé sur une approche de chaîne.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à deux approches de routage hiérarchique différentes afin de démontrer les bénéfices d'une approche basée sur les chaînes.

Nous commencerons par une description du simulateur que nous avons utilisé, ensuite, nous parlerons du modèle d'énergie utilisé pour la simulation des protocoles avant de passer à l'interprétation des résultats obtenus.

VI.2 Environnement de travail

VI.2.1 Les outils de simulation [6]

Lors du développement d'un réseau de capteurs sans fil pour une application réelle, la simulation par logiciel de son comportement et de ses performances est essentielle.

Selon Shannon [47], la simulation est « *le processus de modélisation d'un système réel sur lequel on opère des expérimentations afin de comprendre son comportement et/ou d'évaluer plusieurs stratégies opérationnelles sur ce système* ». Cela veut dire qu'une simulation est une représentation fidèle d'un système réel avec des hypothèses initiales qui permettent de réduire la complexité de la modélisation et qui la rende faisable techniquement. La simulation est souvent utilisée lorsqu'aucune modélisation mathématique n'est possible vu la complexité et la grandeur du système étudié.

Plusieurs simulateurs de RCSFs ou de simulateurs de réseaux adaptés aux RCSFs ont été développés. Par exemple :

- **Castalia Simulator** : simulateur spécialisé uniquement dans les RCSFs ; développé par le laboratoire NICTA et basé sur la plateforme du simulateur OMNeT++. Ce dernier est un simulateur plus général de réseaux.
- **MiXiM** : simulateur basé également sur OMNeT++ et spécialisé dans la simulation des RCSFs.
- **TOSSIM** : simulateur de RCSFs développé pour simuler les plateformes utilisant le système d'exploitation TinyOS. Ce simulateur est performant pour modéliser le comportement des couches d'application, mais présente de faibles performances pour simuler le comportement des protocoles MAC.
- **WSNet** : simulateur de RCSFs qui peut être utilisé avec un autre outil de simulation WSim pour générer des codes pour les microcontrôleurs de capteurs.
- **NS2**: simulateur de réseaux qui peut simuler les RCSFs. Il supporte plusieurs protocoles de communication au niveau de toutes les couches OSI. Ce simulateur dispose de la plus grande communauté de développeurs, et donc d'une meilleure notoriété.

Cependant, nous avons choisi comme plateforme d'implémentation, le simulateur NS2 version 2.34, sous le système d'exploitation *LINUX UBUNTU 12.04*. Ce choix est basé sur le fait que le NS2 est le plus populaire des simulateurs dans le domaine académique pour le domaine des réseaux. Sa force réside dans son code ouvert qui a permis aux chercheurs d'évaluer, à chaque fois, leurs contributions pour faire améliorer la recherche sur ce thème.

VI.2.2 Présentation de simulateur NS2

Le NS2 est un outil de simulation orienté objet dirigé par événement qui a prouvé son utilité pour étudier la dynamique des réseaux de communication. Initialement, NS était conçu pour les réseaux de communication filaires depuis 1989 ; puis, plusieurs améliorations ont été opérées pour qu'il supporte les réseaux sans fil et dernièrement les réseaux de capteurs.

NS est connu comme l'outil académique incontournable pour étudier le comportement des protocoles de communication sur tous types de réseaux. Il est flexible et modulaire ce qui a simplifier la tâche des concepteurs, en leur permettant la réutilisation des modules existants d'une manière rapide et efficace.

La figure VI.1 présente une architecture générale du simulateur NS2. Il consiste en deux types de langage de programmation: le C++ et l'OTcl. Le C++ est utilisé pour programmer les entités internes des systèmes simulés, alors que l'OTcl est utilisé pour définir les scénarios des simulations et les paramètres de configuration. Ces deux types de langages sont, ensuite, liés via le TclCL qui permet le passage des codes C++ vers les codes en OTcl et vice versa.

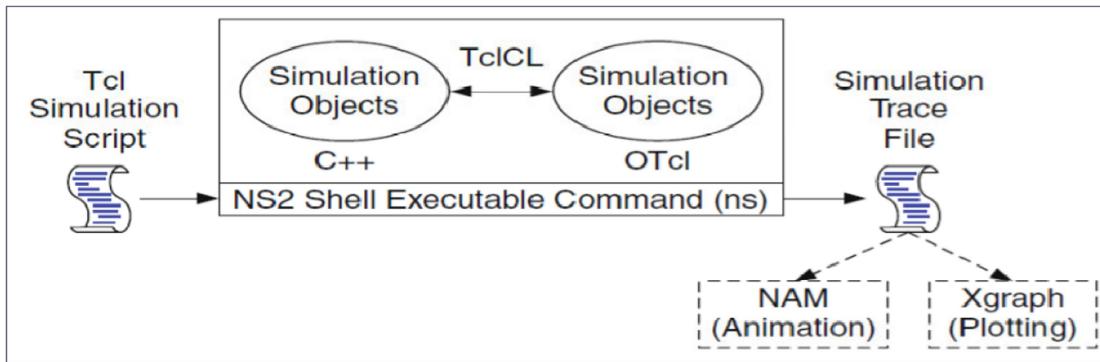


Figure VI.1 Architecture générale du NS2

Une fois la simulation terminée, NS produit deux fichiers de traces qui visualisent la dynamique des systèmes simulés, et qui peuvent être interpréter en utilisant les outils : NAM et Xgraph.

NAM est un outil de visualisation qui présente deux intérêts principaux : représenter la topologie d'un réseau décrit avec NS-2, et afficher temporellement les résultats d'une trace d'exécution NS-2. Par exemple, il est capable de représenter des paquets TCP ou UDP, la rupture d'un lien entre nœuds, ou encore de représenter les paquets rejetés d'une file d'attente pleine.

Plusieurs versions de NS ont été élaborées, la plus récente est la version 3 qui ne support que du code en C++ ; néanmoins, la version 2 est la plus utilisée, jusqu'à présent, dans les recherches académiques.

VI.2.3 Modèle radio

Dans ce travail, nous mettons en œuvre un modèle énergétique qui couvre à la fois, les communications en émission et en réception. C'est un modèle radio utilisé lors de la simulation des protocoles LEACH, LEACH-C et PEGASIS. Ainsi, pour transmettre un message de taille S (bits) sur une distance D (mètres), l'émetteur consomme :

$$E_{Tx} = \begin{cases} S \cdot E_{elec} + S \cdot E_{el} \cdot D^2, & D < D_{seuil} \\ S \cdot E_{elec} + S \cdot E_{mc} \cdot D^4, & D \geq D_{seuil} \end{cases} \quad D_{seuil} = \sqrt{\frac{E_{el}}{E_{mc}}}$$

Avec $E_{elec} = 50 * 10^{-9} \text{ J}$, $E_{el} = 9.67 * 10^{-12} \text{ J}$, $E_{mc} = 1.3 * 10^{-15} \text{ J}$, $D_{seuil} \approx 86$

L'énergie consommée au niveau de la réception est calculée comme suite :

$$E_{Rx} = S * E_{elec}$$

VI.2.4 Paramètres de simulation

Nous avons choisi un environnement de développement NS2 dans lequel les nœuds sont homogènes et déployés aléatoirement dans l'environnement opérationnel. Nous avons considéré un réseau de densité de 100 nœuds déployés dans une surface carrée de $(100 \times 100) m^2$ dont la figure VI.2 montre la topologie de notre réseau avec le positionnement de la station de base qui se trouve à (50, 175).

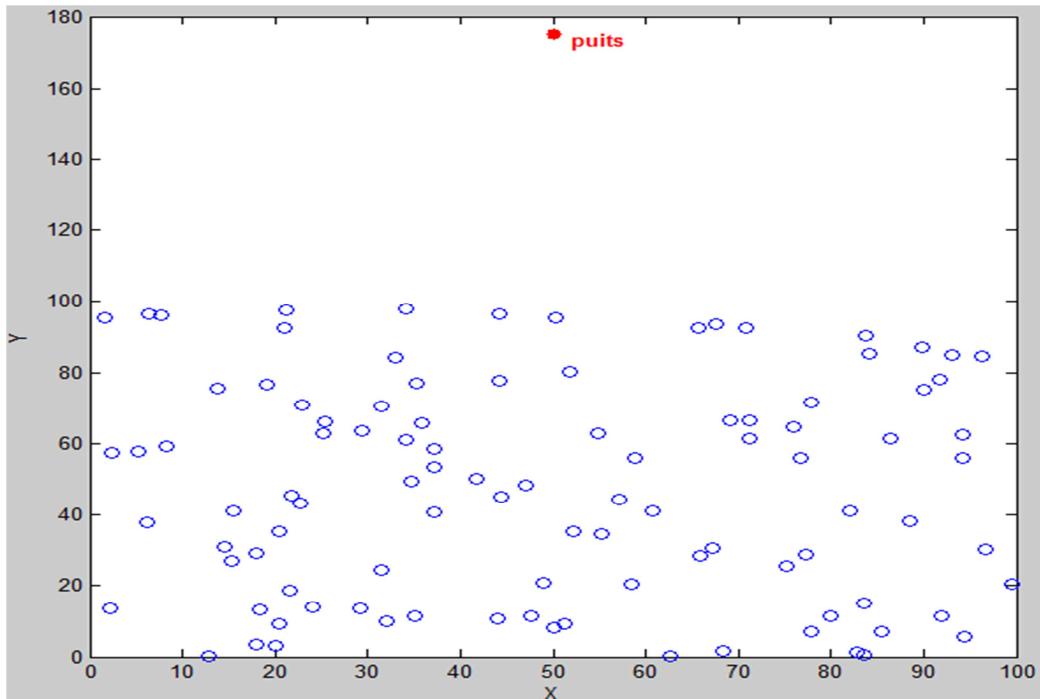


Figure VI.2 Topologie de 100 nœuds aléatoires pour un réseau de $(100 \times 100) m^2$

La communication utilise une politique d'ordonnancement des messages via le modèle de propagation radio DropTail. Le délai d'expérimentation pour le réseau est de l'ordre de 3000 secondes avec un changement de CH, c'est-à-dire un passage à la prochaine itération, après chaque 20secondes.

Tous les nœuds du réseau commencent la simulation par énergie initiale égale à 2 J et une quantité de données illimitées à transmettre à la station de base. De plus, l'énergie de la station de base est considérée comme illimitée.

Nous résumons l'ensemble des paramètres utilisés pour les simulations dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
La surface du réseau	100*100 m ²
La position de la station de base	X=50, Y=175
Le nombre de nœuds	100
L'énergie initiale de nœuds	2J
Eelec (énergie de calcul)	50* 10 ⁻⁹ J/bit
Eel (énergie perdu dans l'espace libre)	9.67 *10 ⁻¹² J/bit/m ²
Emc (énergie de multi-chemin)	1.3*10 ⁻¹⁵ J/bit/m ⁴
Dseuil	86
Le type d'antenne	Omnidirectionnel
Le type de propagation des ondes	DropTail
La vitesse de propagation	3*10 ⁸ m/s
Taille d'un paquet de données	500 octets
Taille de l'en-tête d'un paquet	20 octets
La fréquence	914*10 ⁶ Hz

Tableau VI.1 Les paramètres des simulations

VI.3 Evaluation des performances

Pour évaluer les performances des protocoles LEACH, LEACH-C et PEGASIS, nous nous sommes intéressés essentiellement à la consommation d'énergie des nœuds puisqu'elle constitue un paramètre primordial pour la détermination de la durée de vie d'un RCSF. Nous évaluons donc nos simulations suivant deux métriques qui sont : la consommation d'énergie et la durée de vie des nœuds capteurs.

VI.3.1 La consommation d'énergie

La comparaison de la consommation énergétique des algorithmes LEACH, LEACH-C et PEGASIS a constitué le premier volet de nos simulations. Pour se faire, nous prenons comme critère, l'énergie consommée par le réseau. Les résultats sont illustrés dans la figure suivante :

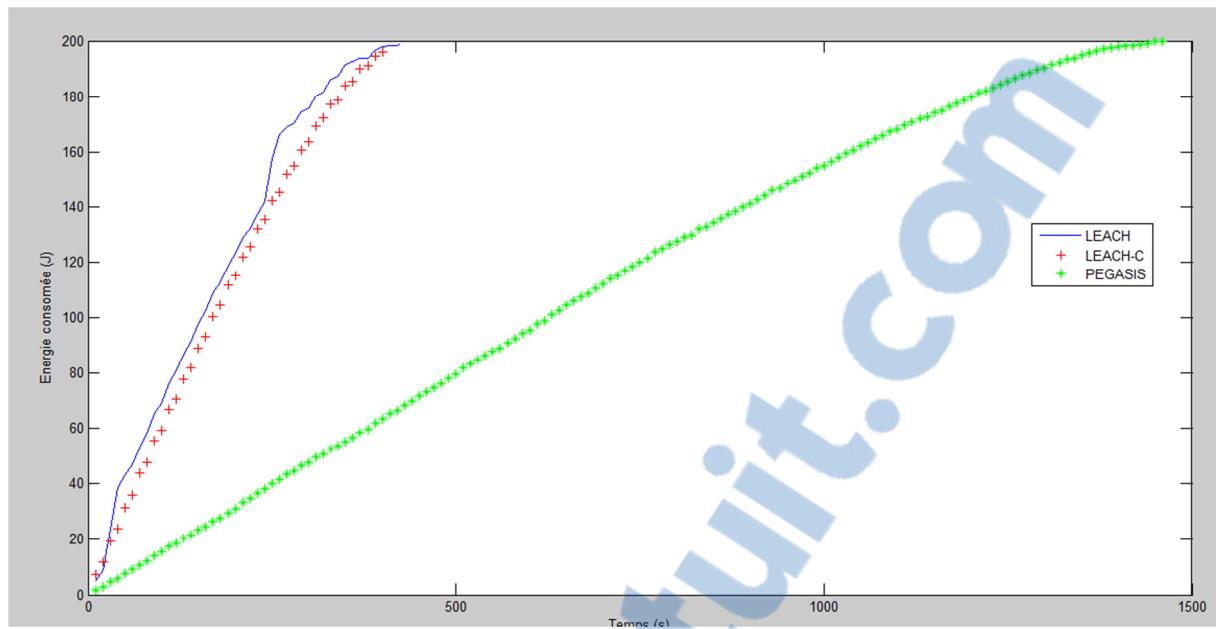


Figure VI.3 Energie consommée dans le réseau

Les résultats obtenus montrent la performance du protocole PEGASIS en termes d'efficacité énergétique. Ce protocole consomme moins d'énergie que les deux autres protocoles, mais comme les nœuds sont organisés de telle sorte à ce qu'ils forment une seule chaîne, une introduction d'un retard excessif est produite par le nœud le plus éloigné sur la chaîne lors de la transmission des données.

Nous remarquons aussi que le protocole LEACH-C consomme moins d'énergie par rapport au protocole LEACH. Il offre, contrairement au LEACH, une distribution équitable des CHs, ce qui évite la concentration des CHs dans une même région. Cette approche diminue la distance entre les nœuds capteurs et leur CH, ce qui minimise la consommation d'énergie.

VII.3.2 La durée de vie du réseau

Pour comparer la durée de vie du réseau entre les différents algorithmes, LEACH, LEACH-C et PEGASIS, nous avons mesuré l'énergie résiduelle des nœuds capteurs chaque 10 secondes tout au long de la durée de simulation, afin de calculer le nombre total des nœuds vivants. Nous avons obtenu comme résultat le graphe de la figure VII.4.

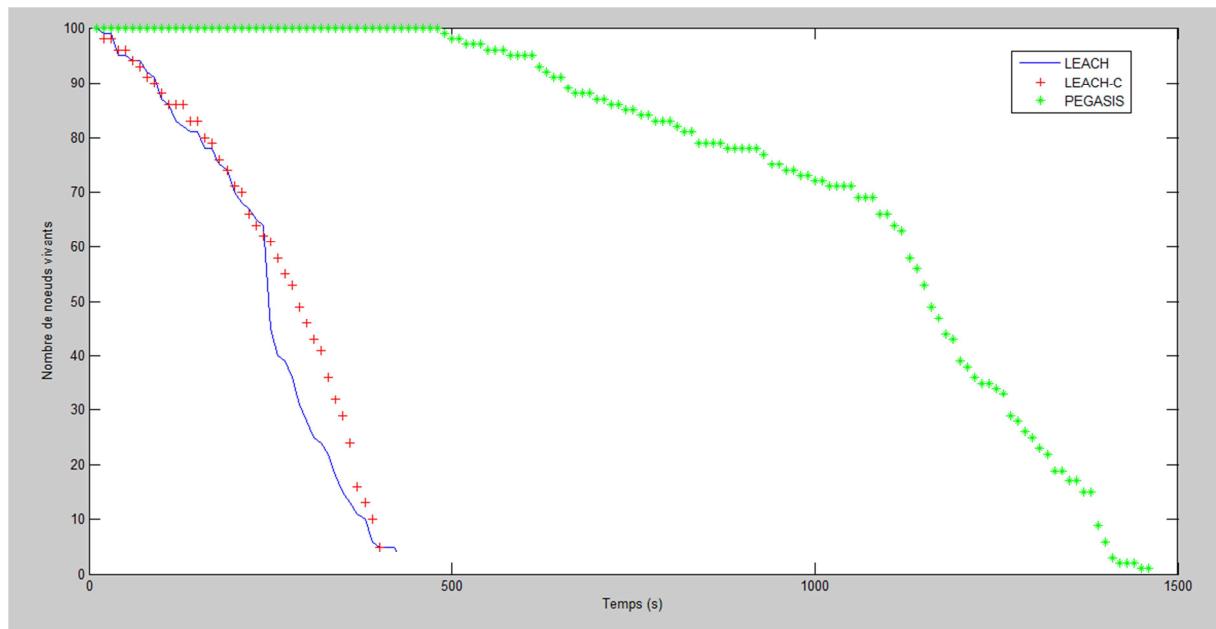


Figure VI.4 Nombre de nœuds vivants

Nous remarquons dans la figure ci-dessus que le protocole PEGASIS est capable de prolonger la durée de vie du réseau trois fois autant que celle du réseau sous les protocoles LEACH et LEACH-C.

Le réseau utilisant le protocole LEACH s'épuise après 400 secondes de la simulation, pendant que le protocole LEACH-C maintient la durée de vie du réseau jusqu'à environ 424 secondes, alors que le protocole PEGASIS peut prolonger la vie du réseau jusqu'à 1460 secondes.

Au niveau du protocole LEACH, la durée de vie du réseau est faible, parce que dans LEACH, les nœuds s'épuisent plus rapidement vu la distance entre les CHs et leurs membres d'un côté et la distance entre les CHs et la station de base. En effet, les phases d'initialisation c'est-à-dire les phases de formation de clusters qui induisent un nombre important de messages de contrôle vont se faire à chaque nouveau round impliquant une consommation d'énergie supplémentaire.

Le protocole LEACH-C arrive à prolonger la durée de vie par rapport au protocole LEACH puisqu'il utilise une architecture centralisée pour choisir les CHs, ce qui rend les nœuds capteurs moins distants de leur CH et donc, ils utilisent moins d'énergie pour transmettre les données et par conséquent, il y aura une augmentation dans la durée de vie des nœuds.

La performance fournie par le protocole PEGASIS est réalisée à travers l'élimination d'overhead causé par la formation de clusters dynamiques dans LEACH.

VI.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les deux différentes approches des protocoles de routage hiérarchique en ce qui concerne la durée de vie du réseau et l'énergie consommée.

Le clustering permet aux nœuds d'effectuer des communications sur de petites distances avec leurs CHs, ces derniers ayant pour tâche de communiquer les résultats de leurs calculs à la station de base. Ceci leur coûte en termes d'énergie. Par contre, dans l'approche basée sur chaîne, le principe de clustering est abandonné, les nœuds du réseau sont organisés de façon à former une grande chaîne, n'auront ainsi besoin de communiquer qu'avec seulement leurs voisins les plus proches et se relaient dans la communication avec la station de base. Ceci réduit l'énergie nécessaire à la transmission des données par cycle, ce qui mène au prolongement de temps de vie du réseau.

L'implémentation des protocoles LEACH, LEACH-C et PEGASIS sous le simulateur de réseau NS2 nous a permis de confirmer la performance de l'approche basée sur les chaînes en terme de prolongement de temps de vie du réseau et de gestion économique d'énergie.

Dans notre travail futur, nous voudrions développer un nouveau protocole de routage hiérarchique en améliorant l'approche de clustering en appliquant le concept de l'approche basée sur chaîne.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil sont qualifiés de technologie émergente qui va bouleverser notre quotidien. Ces composants électromagnétiques d'une taille très réduite et qui communiquent via un réseau sans fil omniprésent, ouvrent largement les horizons des applications construites jusqu'à maintenant.

Caractérisés par une souplesse sans équivoque, les RCSFs permettent une panoplie d'applications qui touchent et continuent à toucher tous les domaines de notre vie ; commençant par les applications militaires, qui ont conçu le berceau dans lequel ils se sont développés ; puis les applications civiles à savoir celles de la surveillance de l'environnement, des structures et du trafic de tout type ; et en arrivant aux applications médicales qui incluent la surveillance des patients à domicile ou à l'hôpital. Cette liste non exhaustive plaide le succès de cette technologie.

Nous avons essayé à travers ce mémoire de faire le tour de ce nouveau phénomène qui touche les réseaux sans fil. Nous avons commencé par présenter les généralités qui entourent le domaine des RCSFs, puis nous avons focalisé notre étude sur la fonctionnalité clé de ces réseaux qui est le routage de données à partir des nœuds sources vers une station de base, qui s'occupe des traitements spécifiques aux applications supportées. Ensuite, nous avons présenté les différentes solutions de routage existantes selon une classification par rapport à la topologie du réseau utilisée.

C'est dans cette optique que nous avons mené nos travaux dans ce projet. En effet, nous nous sommes intéressés aux protocoles de routage hiérarchiques à savoir les protocoles LEACH et PEGASIS et ce qu'ils offrent comme optimisation de prolongement de temps de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique.

Nous avons simulé le fonctionnement des deux algorithmes LEACH et PEGASIS avec le simulateur NS2 version 2.34 dont nous avons fait une étude comparative des résultats obtenus en introduisant le résultat de l'implémentation de l'algorithme LEACH-C pour plus de précision.

En effet, l'étape de simulation nous a posé un véritable défi puisque les codes d'implémentation des protocoles LECH, LEACH-C et PEGASIS sont difficiles à obtenir. De plus, le simulateur NS2 ne prend pas en considération les RCSFs. Donc, nous étions menés le reconfigurer manuellement afin de pouvoir l'utiliser.

Enfin, comme perspectives nous envisageons de proposer un nouvel algorithme qui combine les avantages des deux protocoles dans le but de réduire leurs inconvénients et fournir un meilleur rapport consommation d'énergie/durée de vie.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Mustapha Boushaba, « Routage adaptatif et stabilité dans les réseaux maillés sans fil », Thèse à L'université de Montréal, Faculté des études supérieures.
- [2] C. Schurgers and M.B. Srivastava, “Energy efficient routing in wireless sensor networks”, MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations, 2001.
- [3] Nouha BACCIUR SELLAMI, « CONCEPTION D'UNE NOUVELLE STRATEGIE DE ROUTAGE DYNAMIQUE POUR LES RESEAUX MOBILES AD HOC », Mémoire présenté à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie.
- [4] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_ad_hoc.
- [5] Louise Lamont, Louise, Centre de recherches sur les communications Canada CRC. Juin 2006.
- [6] YOUSSEF ZIANI, « Étude comparative de méthodes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil pour le domaine résidentiel », Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières, juin 2013.
- [7] Projet de fin d'étude 2005/2006, PRISM, université Versailles Saint-Quentin.
- [8] Akyildiz I., Su W., Sankarsubramaniam Y., Cayirci E., «A Survey on Sensor Networks», Georgia Institute of Technology, IEEE Communications Magazine, Aout 2002. (Projet de fin d'étude 2005/2006, PRISM, université Versailles Saint-Quentin).
- [9] Holger K., Willig A., « A short survey of wireless sensor networks », Technical university Berlin, Telecommunication Networks Group, Octobre 2003.
- [10] Culler D., Estrin D., Srivastava M., « Overview of sensor networks », University of California, Berkeley, IEEE Computer Society, Aout 2004.
- [11] Fleury E., Chelius G., Mignon T., « minimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs », Laboratoire CITI/INSA de Lyon, 2003.
- [12] Demirkol I., Ersoy C., Alagöz F., « MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey », 2003.
- [13] Akyildiz, I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, « A Survey on Sensor Networks ». IEEE Communication Magazine, Aout. 102-114, 2002.
- [14] Gérard CHALHOUB. « Les réseaux de capteurs sans fil », Novembre 2010.
- [15] Y. Wang, G. Attebury et B. Ramamurthy, “A Survey of Security Issues in Wireless Sensor Networks”, 2005.

Références bibliographiques

- [16] Gaurav Jolly, Mustapha C.Kusçu, Pallavi Kokate et Mohamed Younis. " A Low-Energy Key Management Protocol for Wireless Sensor Networks", Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication. (ISCC'03), IEEE COMPUTER SOCIETY, 2003.
- [17] Yacine Younes, "minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs", mémoire de magister, université MAMMERI de Tizi-Ouzou, septembre 2012.
- [18] Mr Boubiche Djallel Eddine, « Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil », MEMOIRE DE MAGISTERE EN INFORMATIQUE, Université de l'Hadj Lakhdar-Batna, Promotion 2007-2008.
- [19] RAMDANI MOHAMED, « PROBLÈMES DE SÉCURITÉ DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS AVEC PRISE EN CHARGE DE L'ÉNERGIE », MÉMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITÉ DE SAAD DAHLAB DE BLIDA, Novembre 2013.
- [20] José CECÍLIO, João COSTA, Pedro FURTADO, «Survey on Data Routing in Wireless Sensor Networks », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [21] K. Yang. "A study on power-friendly routing protocols for sensor networks". Technical Report, University of Essex Department of Electronic Systems Engineering, Mars 2005.
- [22] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks". Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, Janvier 2000.
- [23] K. Akkaya and M. Younis. "A survey on routing protocols for wireless sensor networks ". Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, 2005.
- [24] Adel CHOUSA. « Traitement et transfert d'images par réseau de capteurs sans fil », mémoire de magister, Université Hadj Lakhder – Batna, 2011.
- [25] Y. Yao and J. Gehrke. "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks". ACM SIGMOD Record, Vol. 31, No. 3, pp. 9-18, Septembre 2002.
- [26] A. Hac. "Wireless sensor network designs ". John wiley and sons ltd edition, 2003.
- [27] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. "A taxonomy of wireless micro-sensor network models". ACM Mobile Computing and Communication Review, Vol. 6, No. 2, pp. 28-36, 2002.
- [28] A. El-Hoidy. "Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power adhoc wireless sensor net works". Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Taormina/Giardini Naxos, Italy, pp. 685-692, Juillet 2002.

Références bibliographiques

- [29] A. K. DWIVEDI, O. P. VYAS, «Network Layer Protocols for Wireless Sensor Networks: Existing Classifications and Design Challenges», International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 8– No.12, 2010.
- [30] KARL H, WILLIG A, «Protocols and Architectures for Wireless Sensor networks», Editorial John Wiley & Sons Ltd, ISBN 13978-0-470-09510-2, 2006.
- [31] Youssef BENABBASSI, « Application de la redondance pour la surveillance par réseau de capteurs sans fil : Cas du réseau de capteurs image sans fil », thèse de doctorat, Université d'Oran, 2014.
- [32] Yacine younes, « Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs », mémoire de magister, Université MOULLOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [33] « Les réseaux de capteurs », Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013-2014.
- [34] Heinzelman, M. ET Perillo, W. Wireless Sensor Network Protocols. [éd.] CRC Hall. 2005.
- [35] Khaled BOUCHAKOUR, « Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil: Protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy) », mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de MAGISTER EN INFORMATIQUE, Ecole Doctorale, 2012.
- [36] YOUSEF Yaser, « Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de capteurs Sans Fil », Thèse de Doctorat, Soutenue le 08/07/2010.
- [37] M. Aissani, A. Mellouk, N. Badache, and M. Boumaza, « A Novel Approach for Void Avoidance in Wireless Sensor Networks », Int'l Journal of Communication Systems (IJCS), John Wiley & Sons Editions, vol. 23(8), pp. 945-962, 2010.
- [38] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill. "Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks". Proceedings of ACM SIGCOM, 2004.
- [39] I. Stojmenovic and X. Lin. "Power aware localized routing in wireless networks". Power, Vol. 12, No. 11, pp. 1122-1133, 2004.
- [40] Luis Javier García VILLALBA, Ana Lucila Sandoval OROZCO, Alicia Triviño CABRERA, Cláudia Jacy Barenco ABBAS, «Routing Protocols in Wireless Sensor Networks», Sensors 2009, 9, 8399-8421, ISSN 1424-8220, 2009.
- [41] Ian F. AKYILDIZ, Mehmet Can VURAN, «Wireless Sensor Networks», John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [42] Y. Yaser, « Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil», Thèse de Doctorat, université de Haute Alsace, 08 juillet 2010.

Références bibliographiques

- [43] Samra Boulfekhar, «Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs», Mémoire de Magistère, Université Abderahmane Mira de Bejaïa, 2006.
- [44] Wendi Beth Heinzelman, «Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Network », IEEE Transactions on Wireless Communications, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
- [45] Sachin Mujumdar, « Prioritized Geographical Routing In Sensor Networks », Thèse, Université Vanderbilt, Mai 2004.
- [46] LEHSAINI Mohamed, « Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique », thèse de doctorat, Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur && Université de Franche-Comté U.F.R Sciences et Techniques École Doctorale SPIM, 2009.