



HAL
open science

Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Mehdi Bouallegue

► **To cite this version:**

Mehdi Bouallegue. Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université du Maine, 2016. Français. NNT : 2016LEMA1011 . tel-01400679

HAL Id: tel-01400679

<https://theses.hal.science/tel-01400679>

Submitted on 22 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mehdi BOUALLEGUE

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université du Maine*

École doctorale : SPIGA

Discipline : 61/27

Spécialité : Acoustique/Télécommunications

Unité de recherche : LAUM

Soutenu le : 31/03/2016

Thèse N° :

Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

JURY

Rapporteurs : **Iyad DAYOUB**, Professeur, Université de Valenciennes, France
Rabah ATTIA, Professeur, École Polytechnique de Tunis, Tunisie

Examineurs : **Daniel ROVIRAS**, Professeur, Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Paris
Nourdin YAAKOUBI Maitre de conférences, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs
(ENSIM), France
Tahar EZZEDINE, Maitre de conférences, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT),
Tunis, Tunisie

Directeurs de Thèse : **Kosai RAOOF**, Professeur, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans (ENSIM),
France
Ridha BOUALLEGUE, Professeur, Ecole Supérieure de Communication (Sup'Com), Tunisie

Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse en cotutelle internationale pour obtenir le grade de docteur de l'Université du Maine sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans, spécialité Acoustique et le grade de docteur de l'université de Tunis El Manar délivré par l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, spécialité Télécommunications.

Le travail que nous présentons dans cette thèse a été réalisé au sein du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM) en collaboration avec le laboratoire Systèmes de communications (Sys'COM) de l'ENIT en Tunisie et le Laboratoire INNOV COM de Sup'com Tunis.

Cette thèse a été codirigée par le Professeur Kosai Raouf à l'ENSIM, Le Mans et le Professeur Ridha Bouallegue à Sup'Com.

Liste des acronymes

AODV	Ad hoc On demand Distance Vector
CH	ClusterHead
CTS	Clear To Send frame
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector
DSN	Distributed Sensor Network
DSR	Dynamic Source Routing
EDSR	Energy-aware Dynamic Source Routing
EED	End-to-End Delay
ELMA	Enhanced Lifetime Maximisation Algorithm
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for mobile communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JBREWS	Joint Biological Remote Early Warning System
LAN	Local Area Network
LEACH	Low-energy Adaptive Cluster Hierarchy

LED	Light-Emitting Diode (Diode Electroluminescente)
LEERA	Localized Energy Efficient Routing for wireless sensor
LLC	Couche liaison de données
LMAWSN	Lifetime Maximisation Algorithm for Wireless Sensor Network
LOS	Line Of Sight
MAC	Media Access Control
MPR	Multi Point Relay (Relai MultiPoint)
OLSR	Optimized Link State Routing protocol
OSI	Open Systems Interconnection
PDF	Packet Delivery Fraction
QoS	Qualité de service
RAM	Random Access Memory
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
RREP	Route REPonse
RREQ	Route REQuest
RTS	Request To Send frame
TC	Topology Control
TCP	Transmission Control Protocol
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
UDP	User Datagram Protocol
WAN	v Wide Area Network
WATS	Wide Area Tracking System
WLAN	Wireless Local Area Network
WiFi	Wireless Fidelity
WSN	Wireless Sensor Network
WSN	Wireless Sensor Network

« Dieu bénit l'homme, Non pour avoir trouvé, mais pour avoir cherché. »

Victor Hugo.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont constitués d'un grand nombre de noeuds de capteurs qui sont généralement alimentés par batterie et conçu pour fonctionner pendant une grande période. Les domaines d'application sont nombreux et variés, tel que le domaine environnementale, médicale et militaire.

L'atout majeur de ce dispositif est un déploiement à grande échelle sans aucune maintenance. Les capteurs n'ont pas besoin d'une infrastructure établie pour parvenir à transmettre des données vitales à l'étude de l'environnement. Il est nécessaire également de garantir une bonne qualité de service, car les réseaux de capteurs sans fils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque noeud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. C'est pourquoi, il est nécessaire d'optimiser la consommation d'énergie à tous les niveaux de conception de ce type de réseau. Par conséquent, la minimisation de la consommation d'énergie est un facteur de conception des plus importants dans les réseaux de capteurs.

Le but de cette thèse est étudier les différents techniques de routages existant dans un contexte sans fil multi-saut afin d'obtenir de meilleures performances. Nous portons notre étude sur les protocoles de routages les plus connus afin de proposer dans une deuxième partie un nouveau protocole de routage permettant d'optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, en gardant une qualité de service optimales.

Mot clés : Réseaux de capteurs sans fil, optimisation de l'énergie, NS2, Modèle énergétique, Protocole de routage, métrique de performance, puissance de transmission.

Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) are composed of a large number of sensor nodes that are typically battery-powered and designed to operate for a long period. Application areas are many and varied, such as the environmental field, medical and military.

The major advantage of this device is a large-scale deployment without any maintenance. The sensors do not need to achieve an established infrastructure to transmit vital data to the study of the environment. It is also necessary to ensure good quality service, because without sensor networks must incorporate mechanisms that allow users to extend the life of the entire network, as each node is supplied by a limited power source and generally irreplaceable. Therefore, it is necessary to optimize the power consumption at all levels of design of this type of network. Accordingly, minimization of power consumption is one of the most important design factors in sensor networks.

The aim of this thesis is study the different existing routing techniques in a context without multi-hop sensor to get better performance. We carry our study of the most popular routing protocols to offer in a second part a new routing protocol for optimizing energy consumption without sensor networks, keeping an optimal quality of service.

Key words : wireless sensor network, energy conservation, routing protocol, power transmission, metrics.

Remerciement

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je veux exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mes directeurs de thèse **Professeur Kosai RAOOF** et **Professeur Ridha BOUALLEGUE** pour la confiance qu'ils ont su m'accorder, leurs orientations judicieuses, leurs soutien sans faille et surtout l'esprit de recherche, qu'ils ont su m'insuffler. Qu'il sache que je leur serais toujours reconnaissant.

Je souhaite remercier les membres de mon jury de thèse :

Mr Iyad DAYOUB Professeur à l'Institut des sciences et techniques de Valenciennes et **Mr Rabah ATTIA** Professeur à l'école Polytechnique de Tunis, pour avoir accepté de rapporter ma thèse.

Mr Daniel ROVIRAS Professeur au CNAM-Paris, **Mr Tahar EZZEDINE** Maitre de conférences à ENIT et **Mr Nourdin YAAKOUBI** Maitre de conférences à l'ENSIM, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en me faisant l'honneur de l'examiner.

Je souhaite également remercier tous les membres du laboratoire SYSCOM, INNOV'COM et LAUM pour leurs supports et encouragements tout au long de cette thèse.

Je ne trouverais sans doute pas les mots pour remercier à leur juste valeur les personnes qui me sont les plus chères : les membres de ma famille. Pour leur soutien sans faille, leur patience, et tout ce qu'ils ont pu m'apporter comme bonheur. Qu'ils sachent à travers ces quelques mots, l'expression de mes remerciements pour leur patience et leur soutien inestimable.

Et enfin à ma chère épouse, pour son soutien, qui a été à mes côtés dans les moments de joie et de

difficultés et qui m'a enveloppé de tendresse et d'affection. Qu'elle sache que je ne la remercierai jamais assez pour sa patience, ses conseils et son appui.

Enfin, à tous ceux que je n'ai pas pu citer, auxquels je réitère mes sincères remerciements.

A vous tous, Merci !

Dédicaces

A mes chers parents et beaux-parents

A mon chère épouse.

Table des matières

Introduction	1
1 Les réseaux de capteurs sans fil : Principes et Caractéristiques	5
1.1 Introduction	7
1.2 Les réseaux ad-hoc (IEEE 802.11)	7
1.3 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)	9
1.3.1 Architecture d'un noeud capteur	9
1.3.2 Caractéristiques d'un capteur sans fil	11
1.4 Caractéristiques liées au RCSF	13
1.4.1 L'auto-configuration des noeuds capteurs	13
1.4.2 La qualité de service (QoS)	14
1.4.3 La capacité de communication	14
1.4.4 Les types de communication	14
1.4.5 Scalabilité et collaboration entre les capteurs :	15
1.4.6 Déploiement	15
1.4.7 Tolérance aux pannes	15
1.4.8 Le routage	16
1.5 Domaines d'applications des RCSFs	16
1.5.1 Applications militaires	16
1.5.2 Applications environnementales et agricoles	17
1.5.3 Applications médicales	18
1.5.4 Applications de surveillance	18
1.5.5 Applications industrielles	18

1.5.6	Applications commerciales	19
1.5.7	Applications domestiques	19
1.6	Facteurs et enjeux dans les RCSFs	19
1.6.1	Les facteurs d'un RCSF	20
1.6.2	Les enjeux	20
1.7	Conclusion	21
2	Les Protocoles utilisés dans les RCSFs	22
2.1	Introduction	23
2.2	Principes des Techniques de routages	23
2.3	Les protocoles de routages proactifs	24
2.3.1	Le protocole de routage DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)	24
2.3.2	Le protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing)	24
2.3.3	LEERA (Localized energy efficient routing for wireless sensor networks)	26
2.4	Les protocoles de routages réactifs	28
2.4.1	DSR (Dynamic Source Routing)	29
2.4.2	AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)	29
2.4.3	« Energy aware routing »	31
2.4.4	EDSR (Energy-aware DSR)	33
2.5	Les protocoles de routages hybrides	35
2.5.1	Protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	35
2.5.2	Protocole ELMA (Enhanced Lifetime Maximisation Algorithm)	36
2.6	Conclusion	39
3	Le module RF et la consommation énergétique	41
3.1	Introduction	42
3.2	Le simulateur Network Simulator 2	42
3.2.1	Présentation	42
3.2.2	Les agents et les applications	42
3.2.3	Le modèle énergétique	43
3.3	La couche liaison	44
3.3.1	Rôle de la sous-couche MAC	45
3.3.2	Critères de performances des mécanismes d'accès au canal	46
3.3.3	Efficacité des stratégies de mise en veille	47
3.4	Le modèle de portée de transmission	48

3.4.1	La couche réseau	48
3.4.2	Modèle de propagation	49
3.5	Les résultats obtenus pour les modèles énergétiques	51
3.5.1	Les métriques utilisées	51
3.6	Simulations et résultats	52
3.6.1	Consommation énergétique	53
3.6.2	Rapport de paquet reçus	53
3.6.3	Délai de transmission et nombre de paquets perdu	54
3.6.4	Débit	54
3.7	Conclusion	55
4	Les nouveaux protocoles de routage et leurs critères	57
4.1	Introduction	58
4.2	Problématique récurrente de la durée de vie d'un réseau de capteur	58
4.2.1	Problématique	59
4.2.2	La consommation énergétique	59
4.3	Les techniques multi-chemins dans les réseaux de capteurs sans fil	64
4.3.1	Objectifs et composants d'une solution de routage multi-chemin	65
4.3.2	Types de chemins multiples	65
4.4	Conception et application du protocole CEDM-DR	66
4.4.1	Principe l'algorithme CEDM-DR	67
4.4.2	Modèle énergetique adopté dans CEDM-DR	68
4.4.3	L'algorithme CEDM-DR	69
4.5	Simulations et résultats	69
4.6	Conclusion	71
	Conclusion générale	74
	Bibliographie	75
	Liste des publications	80

Table des figures

1.1	Capteurs sans fil.	10
1.2	Architecture matérielle typique d'un capteur sans fil.	10
1.3	Illustration de la zone de communication et de perception d'un capteur.	13
1.4	Domaines d'applications.	17
2.1	Diffusion pure et diffusion en utilisant les MPRs dans OLSR.	25
2.2	Schéma de la méthode « Sleep-WakeUp ».	27
2.3	Datagramme des messages RTS/CTS.	27
2.4	Datagramme avec le STEM pipeline.	28
2.5	Protocole DSR : Construction de la route.	30
2.6	Protocole DSR : Le renvoi du chemin	30
2.7	Schématisation des zones pour un protocole de routage hybride.	36
3.1	Circuit de la transmission des données.	44
3.2	Pile protocolaire d'un capteur sans fil.	45
3.3	Représentation de l'énergie sauvegardée par la stratégie de mise en veille.	47
3.4	Différents mécanismes de propagation de l'onde.	50
3.5	La consommation énergétique des trois protocoles pour différentes portées de transmission.	53
3.6	Le rapport des paquets reçus pour les trois protocoles pour différentes portées de transmission.	54
3.7	Le délai des paquets pour parvenir au point de collecte	54
3.8	Nombre total de paquets perdus	55
3.9	Le débit des trois protocoles pour différentes portées de transmission	56
4.1	Noeuds critiques dans un réseau	58

4.2	Exemple de simulation d'un RCSF de 100 noeuds, NS2	60
4.3	Exemple d'un fichier trace, NS2	61
4.4	Récupération des données du fichier trace	62
4.5	Information sur une requête de routage	62
4.6	Positionnement des noeuds lors de la simulation	63
4.7	Les informations concernant le noeud capteur numéro 35	63
4.8	Les informations concernant le noeud capteur numéro 15	64
4.9	Les informations concernant le noeud capteur numéro 66	64
4.10	Protocoles de routage multi-chemin	66
4.11	Circuit de la transmission des données.	68
4.12	Simulation du nouveau protocole de routage	71
4.13	Perte d'énergie pour les protocoles de routage	72
4.14	Le nombre de noeuds vivant pendant la simulation	72
4.15	Le nombre de noeuds vivant pendant la simulation	73

Liste des tableaux

3.1 Paramètres de simulations	52
3.2 Les différentes portées de transmissions utilisées	52
4.1 Paramètres de simulations	70

Introduction générale

Dans la société d'aujourd'hui qui est en constante évolution, la communication, l'image et la mobilité prend une place importante. Ces avancées technologiques ne sont possibles que par une évolution dans les techniques de communication, et principalement dans les communications sans fils et dans le domaine de l'informatique. Les technologies qui ont vu le jour à la fin du XX^{eme} siècle, comme le téléphone portable et internet sont les prémices et vecteurs de la révolution technologique qui définissent le monde d'aujourd'hui. Le défi qui a été lancé ces dernières années est de pouvoir faire interagir l'homme avec son environnement. Cette interaction n'est possible que par l'amélioration de la connaissance du monde extérieur. En effet, des informations qui ont pu être émis dans un environnement peuvent être recueillis afin qu'elles soient intégrées dans le cadre d'un processus de décision.

Internet a eu pour effet d'aboutir à des échanges dans le monde entier une énorme quantité de données ainsi que de services avec une grande rapidité. Mais la création d'internet n'a pu voir le jour que par un développement des communications. Depuis sa création, internet n'a pas arrêté de susciter un engouement dans le domaine de la recherche, des affaires mais aussi dans l'éducation. La technique de la communication non-filaire, par exemple utilisé pour les téléphones portable se base essentiellement sur la transmission radio. L'utilisation de ce moyen de communication génère de nouvelles difficultés. Des problèmes de stabilité de la communication due à des déconnexions et des débits variables mais également des complications liés à l'autonomie des objets sans fils en conséquence d'une quantité d'énergie limitée. Mais les possibilités qu'offrent les technologies sans fils peuvent se révéler d'une grande utilité par la flexibilité d'emploi, ainsi que la mise en réseau sur des sites dont l'accessibilité est difficile et couteux voir même impossible pour des réseaux câblés.

Les nouvelles générations de réseaux sans fils ont été développées grâce aux progrès technologiques dans différents domaines. La microélectronique, la communication sans fil, mais aussi la miniaturisation ont été les principaux acteurs permettant cette innovation technologique. Comme beaucoup de développement tech-

nologique, les réseaux de capteurs sans fils ont pris forme pour des besoins militaires dans le cadre de la surveillance. Ils ont trouvé un nouvel essor dans les applications à usage civiles. De nos jours, les réseaux sans fil sont devenus une technologie incontournable quand il s'agit d'environnements dit "intelligents". Elles offrent plusieurs avantages notables et principalement en termes de déploiement. Cependant, de nouveaux problèmes apparaissent qui rendent les réseaux sans fils moins fiables que les réseaux filaires. Ainsi de nouvelles techniques doivent être mise en place pour pallier à ce genre de situation.

Nous retrouvons dans la vie courante l'application des réseaux, qu'elles soient dans l'utilisation des technologies des téléphones mobiles jusqu'aux réseaux locaux sans fils en passant par les réseaux ad-hoc. La recherche d'aujourd'hui s'est focalisée sur une technologie, qui pour beaucoup de personne dans la sphère de la recherche et de la science ne s'apparente plus à une nouvelle technologie mais plus à une évolution significative dans le domaine de la communication et de l'interaction de l'homme avec son environnement. Il s'agit des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network - WSN). Ceux-ci sont composés d'un très grand nombre de nœuds communicants sur une zone donnée afin de mesurer une grandeur physique ou bien dans la surveillance d'un événement. Dans ce type de réseau, tout nœud est un dispositif électronique autonome possédant une capacité de calcul, de stockage, de communication et ainsi qu'une batterie.

Les particularités des réseaux de capteurs sans fil n'ont pas les mêmes critères de performances que les réseaux sans fil traditionnels. En effet, les caractéristiques qui définissent les nœuds composant le réseau ne permettent en aucune façon d'opter pour les mêmes objectifs. Dans les réseaux locaux filaires et les réseaux cellulaires, les critères les plus pertinents sont le débit, la latence et la qualité de service car les nouvelles activités telles que le transfert d'images, le transfert de vidéos, et la navigation sur internet requièrent un débit important, une faible latence ainsi qu'une bonne qualité de service. Alors que les réseaux de capteurs sans fil ont été conçus pour la surveillance d'une zone donnée, la longévité du réseau est le critère le plus important. De ce fait, la conservation de l'énergie est devenue un critère de performance prépondérant et se pose en premier lieu tandis que les autres critères comme le débit ou l'utilisation de la bande passante sont devenus secondaires.

L'objectif de cette thèse est de traiter le problème du routage dans les réseaux de capteurs, surtout ceux à taille importante. Le souci principal est de prolonger la vie du système en économisant l'énergie dépensée par chaque capteur du réseau. Pour cela, nous avons proposé un nouvel algorithme ainsi qu'un nouveau protocole de routage pour permettre une optimisation de la durée de vie du réseau. Ces algorithmes, constituant un protocole de routage a été évalué à l'aide du simulateur « *Network Simulator* » (NS2). Les résultats obtenus ont montré l'efficacité du protocole surtout dans les réseaux de capteurs à grande échelle. Ce mémoire de thèse est structuré autour de quatre chapitres suivis d'une conclusion générale.

Le *premier chapitre* décrit de manière générale le contexte sur les réseaux de capteurs. Dans une première

partie nous décrivons les différents réseaux existants et ce qui a amené à la réalisation et à la conception des réseaux de capteurs sans fils. Dans une deuxième partie, nous développons sur les caractéristiques des capteurs sans fils en insistant sur les différents modules matériels constituant les capteurs tel que : l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de capture. Et enfin, nous présentons les domaines d'applications de tels réseaux, ainsi que des projets qui ont permis l'utilisation et le développement de cette nouvelle technologie des réseaux de capteurs sans fils. Le chapitre se termine par les avantages et les inconvénients que suscite cette technologie, en particulier sur les contraintes de consommation énergétique, de limitation de la bande passante ainsi que de capacité de calcul.

Le *deuxième chapitre* présente un état de l'art sur les différents protocoles de routage populaires lors de l'utilisation des réseaux de capteurs sans fils. Ces techniques de routage sont classées en tant que protocole de routage proactif, réactif et hybride. La particularité des protocoles proactifs est qu'ils disposent toujours en mémoire des routes permettant de joindre toutes les stations du réseau. Les protocoles réactifs, quant à eux, ne gardent que les routes en cours d'utilisation pour le routage. A la demande, le protocole va chercher à travers le réseau une route pour atteindre une nouvelle destination. Et enfin nous exposons les protocoles hybrides qui se présentent comme une combinaison des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif, pour « cartographier » le voisinage proche (par exemple voisinage à deux ou trois sauts) ainsi ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de cette zone prédéfinie, les protocoles hybrides font appel aux techniques des protocoles réactifs pour rechercher des routes. Cette analyse nous a permis de souligner des principaux avantages et inconvénients de chaque classe de routage, en nous guidant par la suite dans nos choix de la technique de routage adoptée lors de nos simulations dans le reste du manuscrit.

Le *troisième chapitre* est une description des simulations effectuées sur Network Simulator 2 (NS2). On aborde dans ce chapitre une présentation du simulateur ainsi que de son fonctionnement et des langages de programmation utilisée. Après une description portant sur les couches de liaisons des réseaux de capteurs et le rôle de la sous-couche MAC permettant trois types de mécanismes, qui sont les mécanismes d'accès au canal, les trames de communication ainsi que les stratégies de mise en veille des capteurs. Notre intérêt se porte sur les modèles énergétiques utilisés ainsi que les modèles de propagation radiofréquence en vue de la minimisation de la consommation énergétique. Nous définissons dans ce chapitre plusieurs métriques permettant d'avoir un aperçu de la qualité des modèles utilisées en modifiant les paramètres de simulation. Notre contribution est d'avoir réalisé des simulations se rapprochant au plus près de l'utilisation des réseaux de capteurs sans fils sur le terrain. En effet, l'utilisation générale que nous retrouvons dans les écrits scientifiques propose différents routages ou techniques permettant une optimisation de l'énergie. Mais il s'agit toujours d'une communication entre deux noeuds, entre un noeud source et un noeud destinataire. Dans les simulations effectuées nous avons un noeud que l'on nommera point de collecte (permettant de collecter toutes les données) et tout autre noeud

se trouvant dans le réseau qui peut se comporter comme un noeud source. Car tout noeud dans un réseau de capteur est susceptible d'envoyer des informations vers un point de collecte. Un autre point sur lequel nous insistons est l'utilisation d'une portée de transmission variable. Le déploiement des noeuds dans un environnement qui peut s'avérer hostile et inaccessible (comme exemple désert, régions montagneuses) reste faisable par l'utilisation d'un moyen de transport aérien mais qui dans ce cas impose à notre réseau une topologie aléatoire et non uniforme.

De plus les capteurs n'étant pas mis en place sur le terrain d'une manière conventionnelle, le matériel peut subir des altérations qui peuvent amener à une perte conséquente des moyens de communications. Il a été intéressant dans ce cas d'avoir un réseau utilisant pour tous les capteurs une portée de transmission différente. Cette portée de transmission variable a été prise pour chaque noeud aléatoirement entre 100 mètres et 300 mètres. La simulation de ces différents scénarios n'a été possible que par l'apprentissage du langage de programmation « OTcl » mais également à la modification du code source du Network Simulator 2 écrit en C++, pour pouvoir intégrer dans celui-ci les modèles désirés qui ont été décrit en début de chapitre.

Enfin *le dernier chapitre* aborde une problématique retrouvée dans la plupart des réseaux de capteurs sans fil et les solutions qui peuvent être mise en place pour palier à ce genre de situation. Dans un premier temps, le chapitre présente une problématique récurrente dans les réseaux de capteurs sans fil ayant une topologie non uniforme des noeuds le composant. Il s'agit de la consommation excessive d'énergie des capteurs se situant à proximité du point de collecte. En effet, le point de collecte qui reçoit toutes les données provenant du réseau de capteur sans fils provoque dans son voisinage une surconsommation de l'énergie car les noeuds voisins sont voués à retransmettre les données vers celui-ci. Cette surconsommation provoque inévitablement une réduction de la durée de vie du réseau car par l'évanouissement des noeuds proches du point de collecte les données n'ont aucune possibilité de parvenir à destination. Les simulations que nous avons réalisés dans le chapitre 4, nous donne la possibilité d'avoir un aperçu des consommations énergétiques et du nombre des données circulant dans le réseau de capteur sans fil par le biais d'une étude sur trois noeuds, qui ont été sélectionnés dans le réseau pour leur positionnement par rapport au point de collecte. Et en deuxième temps, nous proposons en fin de chapitre des solutions pour permettre de résoudre ce genre de situation. Nous abordons le sujet de la technique multi-chemin qui peut être une solution viable afin de permettre le désengorgement du trafic des données et ainsi d'augmenter la durée de vie du réseau. Nous donnons également une deuxième solution, en utilisant un nouveau protocole de routage le « CEDM-DR ». Ce nouveau protocole de routage a la possibilité de composer avec plusieurs métriques afin de définir un chemin vers le point de collecte permettant d'avoir une consommation énergétique homogène dans le réseau de capteurs sans fils. Cette contribution nous a permis grâce à plusieurs simulations d'augmenter la durée de vie de notre réseau.

Les réseaux de capteurs sans fil : Principes et Caractéristiques

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Les réseaux ad-hoc (IEEE 802.11)	7
1.3	Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)	9
1.3.1	Architecture d'un noeud capteur	9
1.3.2	Caractéristiques d'un capteur sans fil	11
1.4	Caractéristiques liées au RCSF	13
1.4.1	L'auto-configuration des noeuds capteurs	13
1.4.2	La qualité de service (QoS)	14
1.4.3	La capacité de communication	14
1.4.4	Les types de communication	14
1.4.5	Scalabilité et collaboration entre les capteurs :	15
1.4.6	Déploiement	15
1.4.7	Tolérance aux pannes	15
1.4.8	Le routage	16
1.5	Domaines d'applications des RCSFs	16
1.5.1	Applications militaires	16
1.5.2	Applications environnementales et agricoles	17
1.5.3	Applications médicales	18
1.5.4	Applications de surveillance	18
1.5.5	Applications industrielles	18
1.5.6	Applications commerciales	19
1.5.7	Applications domestiques	19
1.6	Facteurs et enjeux dans les RCSFs	19

1.6.1	Les facteurs d'un RCSF	20
1.6.2	Les enjeux	20
1.7	Conclusion	21

1.1 Introduction

L'apparition récente des communications sans fils accessibles sur des portables, l'évolution des dispositifs de calcul ainsi que les progrès en infrastructure de communication ont abouti au développement rapide des réseaux sans fil.

Le développement des réseaux cellulaires voit une évolution exponentielle des réseaux cellulaires qui sont basés sur la combinaison de la technologie câblée et sans fil. Dans les réseaux cellulaires connus, comme pour les GSM, chaque antenne possède une couverture géographique bien défini et lors des déplacements de l'utilisateur ainsi que du téléphone mobile change de cellule. On dit que ce genre de réseau a une infrastructure fixe. Quand l'infrastructure est inexistante, nous pouvons parler d'un réseau ad-hoc. Un tel réseau se caractérise par l'absence d'infrastructure fixe pour les noeuds qui composent le réseau.

Le rôle le plus important d'un noeud est le transfert des informations vers d'autres nœuds présents dans le réseau, par le biais d'une gestion du routage des données. Il a également la possibilité de gérer les reconfigurations topologiques des noeuds du réseau. Différents critères qui peuvent être combinés tels que le routage, la qualité de service et la sécurité rendent bien plus complexes la réalisation et la mise en place de ce type de réseau.

1.2 Les réseaux ad-hoc (IEEE 802.11)

A la différence des réseaux filaires les noeuds composant les réseaux sans fil sont liés par ondes radio. Les réseaux sans fil utilisent actuellement pour la communication la norme 802.11. Il existe deux types qui pouvant composer un réseau, il s'agit d'une part des équipements composant le réseau pour communiquer des informations et n'ayant aucune infrastructure et d'autre par des équipements utilisant le réseau pour la communication des informations en se reposant sur des infrastructures préétablies.

Nous pouvons prendre comme exemple dans la téléphonie, les appareils téléphoniques et les stations de bases. Ces types de réseau utilisent donc un mode faisant intervenir des infrastructures puisque les communications ont besoin d'une base pour gérer le réseau. Dans un réseau fonctionnant sans infrastructure, il n'y a aucun besoin d'une forme d'infrastructure pour pouvoir gérer le réseau. Tout équipement composant le réseau peut réceptionner et envoyer des informations mais également agir comme un routeur pour la transmission de données aux autres membres du réseau. Ce genre de réseau est appelé réseau ad-hoc [1]. Nous comptons dans le monde plus de quatre milliards d'utilisateurs du réseau cellulaire, et ce nombre ne cesse d'augmenter. Bien que les efforts de recherche et de développement consacrés aux réseaux sans fil traditionnels soient toujours considérables, l'intérêt de la communauté scientifique et industrielle dans le domaine des télécommunications a récemment changé avec des scénarios plus stimulants dans lesquels un groupe d'unités mobiles

équipées d'émetteurs-récepteurs de radio communiquent sans aucune infrastructure fixe. Plusieurs systèmes utilisent déjà le modèle cellulaire et connaissent une très forte expansion à l'heure actuelle mais requièrent une importante infrastructure logistique et matérielle fixe.

La contrepartie des réseaux cellulaires sont les réseaux mobiles ad-hoc. Un réseau mobile ad-hoc peut être défini comme une collection d'entités mobiles interconnectées par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide de toute administration ou de tout support [2].

Un réseau mobile ad-hoc est composé d'équipements mobiles (par exemple, un routeur interconnectant différents hôtes et équipement sans fil) que l'on nomme noeuds qui ont la possibilité de se déplacer sans aucune contrainte. Un système autonome de noeuds mobiles compose donc le réseau mobile ad-hoc. Ce système a la possibilité de fonctionner d'une manière isolée ou bien d'une manière synchronisé avec des réseaux fixes au travers de passerelles. Cette caractéristique unique permet aux réseaux ad-hoc de se différencier par rapport aux réseaux sans fil traditionnels comme les réseaux cellulaires et les autres réseaux sans fil. Cela veut dire qu'il est possible que ce type de réseau ait une taille très importante [1]. Nous citons un exemple pour chaque type de réseau :

- LAN (Local Area Network) et WAN (Wide Area Network) : Ensemble d'équipements (ordinateurs, imprimantes, serveurs, etc.) interconnectés à l'aide de câble. Nous pouvons prendre comme exemple : internet.
- WLAN (Wireless Local Area Network) : Le réseau cellulaire (GSM) composé de téléphones mobiles sans fil et des stations fixes.
- MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK) : Plusieurs équipements mobiles connectés via le radio. Nom commun pour désigner un réseau ad-hoc non filaire (ensemble d'équipements fixes connectés via le radio.)

Par la suite, nous parlerons d'un réseau ad-hoc nous considérons le réseau ad-hoc non filaire. Un réseau ad-hoc filaire (des équipements connectés avec fil) n'a pas vraiment d'intérêt et dans ce cas, son utilisation dans une mise en place d'un réseau, très rare. Une application très importante des réseaux ad-hoc est celle de la mise en place rapide d'un réseau de communication dans le cas de catastrophe majeure sur des zones dépourvues d'infrastructures ou encore dans le cas où l'infrastructure existante est hors service, voire complètement détruite.

Les exemples les plus réalistes sont ceux de zones soumises à des catastrophes naturelles comme les tremblements de terre, les inondations, etc. Les équipes de secours ont besoin de mettre rapidement en place un réseau de communication pour coordonner les recherches, les informations logistiques, voire désenclaver les populations isolées en leur offrant rapidement un moyen de communication. Une autre application concerne le domaine militaire, puisqu'un tel réseau peut être utilisé pour assurer la liaison entre les différentes unités d'une armée. Vu les caractéristiques et les limitations qu'engendre un réseau ad-hoc, plusieurs problèmes ont

été posés pour ce type de réseaux : problème d'acheminement de l'information, problème de sources d'énergies (capacité des batteries), l'interopérabilité avec d'autres types de réseaux, etc [2]. Nous nous sommes intéressés aux problématiques posées par le routage dans ce type de réseaux et aux solutions proposées.

1.3 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée (information d'entrée) en une autre grandeur physique de nature électrique qui est convertit en une valeur mesurée dans une représentation analogique ou numérique (utilisable), telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité, une accélération, l'humidité. Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur, lui, en est dépourvu. Et nous pouvons dire que les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données et que leur mise en oeuvre est du domaine de l'instrumentation [3].

1.3.1 Architecture d'un noeud capteur

L'évolution technologique nous permet d'accepter et de conforter la présence de l'informatique et de l'électronique au coeur du monde réel. Nous voyons de nos jours de plus en plus d'objets électroniques et d'objets connectés équipés de différents modules permettant de traiter les informations mais également de les retransmettre. La technologie des réseaux de capteurs entre dans cette catégorie. En effet, il s'agit d'un ensemble d'objets, ou capteurs, ayant des ressources particulièrement limitées, mais qui néanmoins ont la possibilité d'acquérir des données de l'environnement dans lequel ils sont déployés, de les traiter et aussi de les transmettre [4].

Les capteurs sont des objets de taille réduite avec des ressources très limitées, qui sont autonomes et sont capables de traiter les informations de l'environnement qui les entoure et de les transmettre à d'autres dispositifs grâce aux ondes radios sur une distance limitée. Les RCSFs se composent d'un grand nombre de capteurs, pour former un réseau sans infrastructure établie. Un capteur a pour objectif d'analyser l'environnement dans lequel il est déployé, et transmet les données récoltées aux différents noeuds capteurs se trouvant dans sa zone de couverture. Ainsi de suite, chaque noeud relaye l'information à un point de collecte où les toutes les données sont recueillies. Chaque capteur relayant l'information sur sa propre zone de couverture, l'environnement où sont déployés les capteurs se trouve entièrement couvert.

Un noeud capteur contient quatre [5] unités de base : l'unité de capture, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'éner-

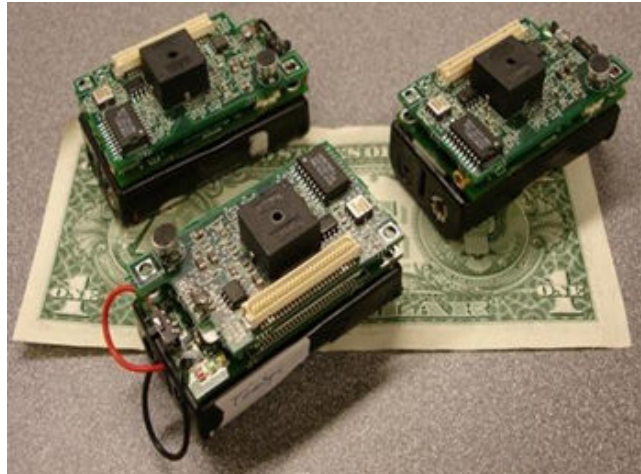


FIGURE 1.1 – Capteurs sans fil.

gie (cellule solaire). On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité. La figure 1.2 présente les différents composants qui constituent un capteur sans fil. Pour être plus précis chaque groupe de composants possède son propre rôle [6].

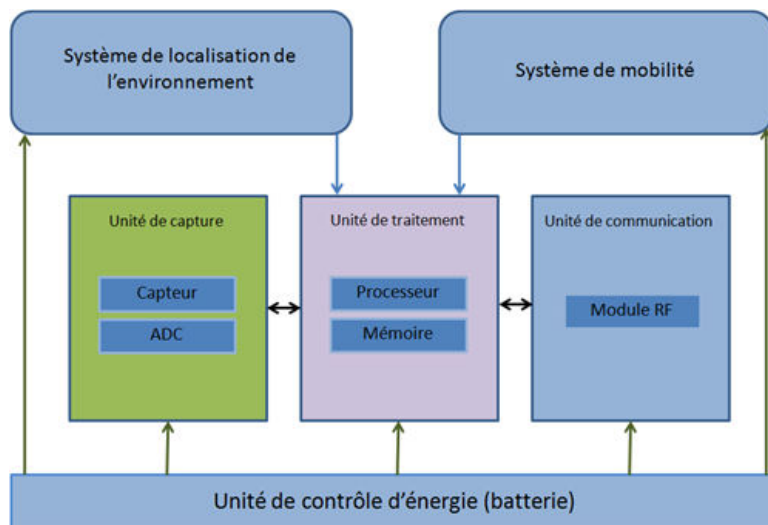


FIGURE 1.2 – Architecture matérielle typique d'un capteur sans fil.

Unité de traitement :

L'unité de traitement est généralement composée d'une mote, d'un processeur, d'une mémoire RAM et Flash. On appelle généralement mote la carte physique utilisant le système d'exploitation pour fonctionner. Celle-ci a pour coeur le bloc constitué du processeur et des mémoires RAM et flash. Cet ensemble est la base

du calcul binaire et du stockage, temporaire pour les données et définitif pour le système d'exploitation. Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le noeud avec les autres entités du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du noeud puits.

Unité de communication :

Les équipements étudiés sont donc généralement équipés d'une radio ainsi que d'une antenne. Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans fil. Elle peut être de type optique (comme dans les noeuds Smart Dust), ou de type radiofréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles.

Unité de capture :

On retrouve donc des équipements de différents types de détecteur et d'autre entrée. Le capteur est généralement composé de deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant l'analyse) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

Unité de contrôle d'énergie :

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique pour alimenter tous ses composants qui se présente généralement sous forme d'une batterie (par exemple pile AA normale d'environ 2.2-2.5 Ah, fonctionnant à 1.5 V). Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et est généralement irremplaçable. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules photovoltaïques, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau. Cependant quelques différences existent suivant les fabricants.

1.3.2 Caractéristiques d'un capteur sans fil

Les RCSFs présentent des caractéristiques propres au niveau des capteurs du réseau comme par exemple l'énergie, la portée de transmission, ainsi que de la puissance de stockage et au niveau du réseau qui est formé par ces noeuds comme par exemple la bande passante, le déploiement sur une surface précise, et la topologie du réseau. Les capteurs peuvent recueillir et transmettre des données captées dans l'environnement ou ils sont déployés. Les données recueillies peuvent être un indice sur la pression, la vibration, la température, la vitesse,

etc. Certaines caractéristiques sont prises en compte pour la transmission des données vers d'autres nœuds composant le réseau, tel que :

L'énergie :

L'énergie est considérée comme la principale et fondamentale contrainte dans les réseaux de capteurs sans fil [7]. Chaque nœud fonctionne grâce à une batterie ayant une capacité limitée due à sa petite taille mais également non rechargeable. L'utilisation de ces capteurs se fera, dans la plupart des cas, dans des environnements hostiles ou difficiles d'accès, ce qui ne permettra pas la récupération de celles-ci. Nous pouvons donc dire que toute utilisation de la technologie du réseau de capteur sans fil doit prendre en compte principalement de la problématique « consommation énergétique ».

La portée de transmission :

La capacité de transmission des capteurs est liée au rayonnement des antennes utilisées. La transmission d'information ne peut avoir lieu que si la distance entre les nœuds ne dépasse pas un certain seuil. Bien évidemment la consommation d'énergie est proportionnelle à la distance qui sépare les nœuds. Plus celles-ci sont éloignées et plus la consommation sera importante. La topologie de la zone géographique peut également jouer un rôle car des obstacles peuvent s'ajouter aux contraintes de la transmission des données entre les capteurs [6].

Une zone de perception et une zone de communication peuvent être définies pour un capteur. La zone de perception permet au capteur de détecter des données physiques sur l'environnement qui l'entoure. Dès lors, la zone de communication permet à chaque entité du réseau d'avoir un aperçu des nœuds voisins pour de futures communications et de transmission de données.

La Figure 1.3 montre les zones définies par ces deux rayons pour le capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres nœuds (le capteur B). D'autre part, la zone de perception est la zone où le capteur A peut capter l'événement qui s'y produit.

En effet, pour qu'un capteur ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. Comme les capteurs sont généralement disposés sur la zone à couvrir de façon aléatoire, il est nécessaire de disposer d'une densité importante de nœuds. Mais si la densité de capteurs est trop importante et que la zone que l'on veut surveiller est « trop » couverte, alors des capteurs vont fonctionner inutilement.

La puissance de stockage et de traitement :

La puissance de stockage ainsi que la puissance de traitement des données pour un capteur reste relativement faible. Par exemple, les nœuds capteurs de type « Tmote Sky » [8] sont composés d'un microcontrôleur cadencé

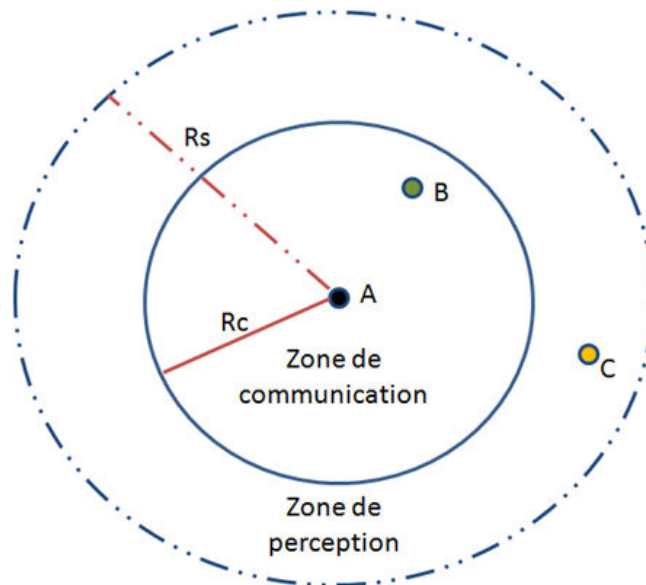


FIGURE 1.3 – Illustration de la zone de communication et de perception d’un capteur.

à 8MHz, 48Ko de mémoire et d’une radio de débit environ 250 kbps avec une fréquence pouvant aller à 2,4 Ghz, la portée de transmission de ce type de capteur peut atteindre 50mètres en lieu clos et de 150200mètres à l’extérieur. Cela reste vrai même pour les noeuds de moyenne gamme, comme les « UCLA/ROCKWELL’S WINS », qui ont un processeur StrongARM 1100 avec une mémoire flash de 1Mo, une mémoire RAM de 128Ko et une radio dont le débit est 100Kbps [9].

1.4 Caractéristiques liées au RCSF

1.4.1 L’auto-configuration des noeuds capteurs

Un réseau de capteur sans fil peut être déployé de deux façons différentes, soit de manière aléatoire à l’aide d’un avion ou de drones, soit de manière bien définie par un humain. Alors un capteur doit avoir la capacité de s’auto-configurer dans un réseau de capteur mais également de pouvoir collaborer avec les autres noeuds du réseau. Chaque capteur du réseau possède un module possédant une antenne émettrice/réceptrice qui permet de communiquer avec les noeuds qui sont proches. Ainsi en échangeant des informations avec ces voisins, tout noeud dans le réseau aura la possibilité de découvrir les routes qu’il adoptera suivant les besoins de l’application.

1.4.2 La qualité de service (QoS)

Dans les réseaux informatiques classiques, la Qualité de Service (QoS) signifie la capacité du système de communication à garantir les performances exigées par l'application, c'est à dire en termes de délai de transmission de bout-en-bout, de taux de perte et de débit. Cependant, les métriques de QoS sont dépendantes de l'application adoptée en raison de différentes caractéristiques spécifiques de chaque type de données utilisées. En ce qui concerne les réseaux de capteurs sans fils, la QoS est la quantité et la qualité des informations qui sont extraites par les données récoltées sur l'environnement où les capteurs ont été déployés. Le niveau de qualité de service peut être défini par un ensemble de critères et d'attributs tel que le temps de latence, la bande passante, et le nombre de paquets perdus.

1.4.3 La capacité de communication

Il y a deux manières de procéder pour transmettre des données d'un noeud source à un noeud destinataire (puits ou point de collecte). Nous pouvons utiliser une transmission de longue portée donc avec un seul saut afin de transmettre des données vers le point de collecte ou nous avons la possibilité d'utiliser le multi-saut qui permet de transmettre à des noeuds voisins et ainsi de suite vers le point de collecte. Comme évoqué précédemment la consommation énergétique sera proportionnelle à la distance séparant le noeud transmetteur et le noeud de réception, nous pouvons en conclure que le multi saut consomme moins d'énergie [10]. Il s'agit dans ce cas d'un réseau ad-hoc, ce type de transmission de données reste le plus utilisé pour les réseaux de capteur sans fils, qui correspond au mieux au vu de sa consommation énergétique.

1.4.4 Les types de communication

Il existe différents types de communication utilisés dans les RCSFs :

- **Unicast** : Ce type de communication est utilisé pour échanger des informations entre deux noeuds sur le réseau.
- **Broadcast** : La station de base ou « puits » transmet des informations vers tous les noeuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données bien précises, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle.
- **Local Gossip** : Ce type de communication est utilisé par des noeuds 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 point de collecte ce qui contribue à consommer moins d'énergie.
- **Convergecast** : Il est utilisé dans les communications entre un groupe de capteurs et un noeud bien spécifique (qui peut être le point de collecte). 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 noeud

récepteur.

- **Multicast** : Il permet une communication entre un noeud et un groupe de noeuds. Ce type de communication est utilisé dans les protocoles qui incluent le « clustering » dans les quels, le noeud appelé « Clusterhead » s'intéresse à communiquer avec un groupe de capteurs.

1.4.5 Scalabilité et collaboration entre les capteurs :

La particularité du réseau de capteur sans fil est qu'il soit capable de prendre en compte et gérer un très grand nombre de nœuds qui coopèrent pour un même objectif. Contrairement aux réseaux sans fils traditionnels (personnel, local, étendu, etc.). De plus, La collaboration des noeuds est très importante dans les RSCF pour exemple éviter le traitement et la transmission des données redondants sur tout le réseau. Ce genre de traitement est nécessaire afin d'éviter une perte d'énergie et de temps importantes dans le cadre d'une optimisation de la consommation de l'énergie à travers tout le réseau.

1.4.6 Déploiement

Comme nous l'avons noté précédemment, Les capteurs peuvent être déployés d'une manière aléatoire ou déterministe [11].

- La méthode aléatoire où les noeuds sont éparpillés (largués par des avions par exemple) sur la zone à surveiller.
- La méthode déterministe où les noeuds sont placés de manière individuelle à des endroits bien précis dans la zone de détection.

Le nombre important de noeuds utilisés dans un réseau de capteurs empêche souvent leur déploiement suivant un plan initialement établi. Néanmoins, un schéma général pour le déploiement initial doit être conçu pour permettre de réduire les coûts d'installation, d'augmenter la flexibilité d'arrangement des capteurs et faciliter l'auto-organisation des noeuds et leur tolérance aux pannes.

1.4.7 Tolérance aux pannes

Le traitement des erreurs dans un réseau est un critère du bon fonctionnement d'un réseau ainsi que du protocole et des services mis en place. La tolérance aux pannes est la capacité d'assurer la continuité du fonctionnement du réseau sans interruption qui peut être due à un ou plusieurs capteurs pendant les transmissions. Certains capteurs peuvent générer des erreurs ou ne peuvent plus transmettre à cause d'une énergie limitée pour pouvoir continuer à jouer un rôle actif dans le réseau, ou d'une interférence survenue par des champs électriques momentanées. Les protocoles de routage doivent s'adapter et gérer ce genre panne afin de permettre le bon fonctionnement du réseau, mais également au milieu hostile où les noeuds vont être déployés.

1.4.8 Le routage

En réseaux ad hoc, protocoles de routage sont censés appliquer trois fonctions principales [12][13] :

- La détermination et la détection des changements de la topologie du réseau.
- Le maintien de la connectivité réseau.
- Le calcul et la détection des bons itinéraires.

Pour les réseaux de capteurs, moins d'effort a été donnée aux protocoles de routage, même si c'est clair que les protocoles de routage ad hoc tels que DSDV (destination sequenced distance vecteur), TORA (temporally-ordered routing algorithm), DSR (dynamic source routing), et AODV (ad hoc on demand distance vector) ne sont pas adaptées pour le réseaux de capteur pour la cause du type de trafic appelé « plusieurs à un » et que tous les noeuds typiquement transmettent à une seule station de base ou centre de fusion. Néanmoins, certains mérites de ces protocoles se rapportent aux caractéristiques des réseaux de capteurs, comme la communication multi-sauts et le routage QoS. Le routage peut être associé à la compression des données pour améliorer l'évolutivité du réseau.

1.5 Domaines d'applications des RCSFs

La miniaturisation des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs de se développer dans plusieurs domaines d'application [14][15]. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes. 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, surveillance, environnemental, médical, domestique, commercial, etc.

1.5.1 Applications militaires

Le faible coût et le déploiement rapide sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires. Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes. Le projet DSN (Distributed Sensor Network) au DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [16] était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisé les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées. Les chercheurs du laboratoire national Lawrence Livermore ont mis en place le réseau WATS (Wide Area Tracking System) [17]. Ce réseau est composé de détecteurs des rayons gamma et des neutrons pour détecter et dépister les dispositifs nucléaires. Il est capable d'effectuer la surveillance constante d'une

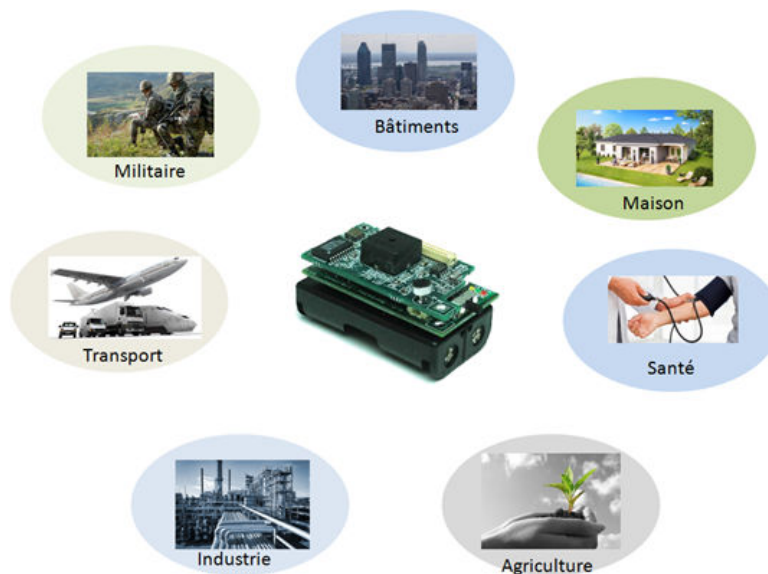


FIGURE 1.4 – Domaines d'applications.

zone d'intérêt. Il utilise des techniques d'agrégation de données pour les rapporter à un centre intelligent. Ces chercheurs ont mis en place ensuite un autre réseau appelé JBREWS (Joint Biological Remote Early Warning System) pour avertir les troupes dans le champ de bataille des attaques biologiques possibles. Un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations). L'armée américaine a réalisé des tests dans le désert de Californie.

1.5.2 Applications environnementales et agricoles

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.).

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole. Cette expérimentation a été réalisée par Intel Research Laboratory and Agriculture and Agri-Food Canada sur une vigne à British Columbia. L'avantage principal de l'utilisation des RCSF dans l'agriculture est l'absence de câblage ce qui réduit considérablement le coût d'installation. Un autre avantage est la flexibilité de déploiement et la facilité d'entretien. En effet, les capteurs sont autonomes et nécessitent très peu d'intervention

humaine sur les champs notamment dans le cas où les protocoles de communication sont tolérants aux panne et supportent la mobilité des noeuds. Plusieurs projets [18], [19], [20] et [21] ont utilisé la technologie des RCSF dans l'agriculture.

Nous pouvons également prendre l'exemple du projet AGROSENS, lancé par le laboratoire Heudiasyc [22], qui signifie HEUristique et DIAgnostic des SYstèmes Complexes, est une unité mixte de recherche entre l'Université de Technologie de Compiègne et le CNRS, qui a pour objectif l'étude et la conception d'une architecture de réseaux de capteurs sans fil (RCSF) pour le contrôle de l'environnement et le développement de pratiques d'agriculture de précision.

1.5.3 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers, etc.). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du coeur, etc. à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière [23]. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient [24].

D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, etc.) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).

1.5.4 Applications de surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de détection de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

1.5.5 Applications industrielles

Les machines de production peuvent être configurées et pilotées en interconnexion grâce à des systèmes d'acquisition et réseaux de capteurs sans fil, autonomes et communicants. Grâce à ce système, la connaissance précise et en continu de l'état de santé des machines est la garantie d'un maintien en conditions d'exploitation optimale (condition monitoring), d'interventions de maintenance réalisées juste au bon moment, et d'économies conséquentes.

Avec de tels systèmes, les opérationnels ont la possibilité de contrôler, anticiper et surveiller les machines à distance. Chocs, vibrations, déplacements, mouvements, paramètres du contexte environnemental (température, pression, É), autant de données stratégiques qu'il convient de collecter en temps réel, au coeur de l'outil de production bien souvent complexe et en milieu contraint.

1.5.6 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un colis, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet [25]. 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.

1.5.7 Applications domestiques

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, etc. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance. Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique s'arrête quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, l'alarme est déclenchée par le capteur anti-intrusion quand un étranger veut pénétrer dans la maison [26].

1.6 Facteurs et enjeux dans les RCSFs

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les RCSFs est un type particulier de réseau ad-hoc. La principale utilité de ce type de réseau est d'établir des échanges d'informations afin d'avoir une vue globale de l'environnement où les noeuds sont déployés. Les informations et données recueillies sont transmises avec l'aide des autres capteurs par des transmissions de proches en proches à un point de collecte. A la réception, l'utilisateur peut estimer l'intérêt des informations recueillies par les capteurs déployés.

1.6.1 Les facteurs d'un RCSF

Un RCSF présente les caractéristiques suivantes :

- **Absence d'infrastructure** : Les réseaux ad-hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la particularité d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée.
- **Taille importante** : Un réseau de capteurs peut contenir des milliers de noeuds.
- **interférences** : Les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.
- **Topologie dynamique** : Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.
- **Sécurité physique limitée** : Les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- **Bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un noeud est limitée.
- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul** La caractéristique la plus importante dans les réseaux de capteurs est la ressource énergétique. Car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie (batterie). Afin de prolonger la durée de vie du réseau [27], une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque noeud du réseau.

1.6.2 Les enjeux

Dans cette section, nous décrirons deux enjeux fondamentaux dans les réseaux de capteurs : le routage et la structuration des réseaux.

Le routage permet l'acheminement des informations vers une destination donnée à travers un réseau de connexion. En effet, le rôle des techniques de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance comme la consommation énergétique. Le but est de trouver l'investissement de moindre coût qui assure le routage du trafic nominal et garantit la qualité de service.

Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux de capteurs est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre de noeuds existant dans un environnement caractérisé par de changements de topologies, de modestes capacités de calcul, de sauvegarde, et d'énergie. Toute conception de protocole de routage implique l'étude des problèmes suivants :

- Minimiser la charge du réseau en optimisant le nombre d'envois et de réceptions des paquets. Cette minimisation aboutit à une consommation énergétique minimale et une longue durée de vie du réseau.
- Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multi-sauts fiables.
- Assurer un routage optimal si possible.
- Offrir une bonne qualité concernant les temps de latence.
- Auto organiser le réseau. Ceci peut être nécessaire dans plusieurs cas. Un réseau comportant un grand nombre de nœuds placés dans des endroits hostiles où la configuration manuelle n'est pas faisable doit être capable de s'auto-organiser. Un autre cas est celui où un nœud est inséré ou retiré (à cause d'un manque d'énergie ou destruction physique). Ainsi le réseau doit être capable de se reconfigurer pour continuer son fonctionnement.

En général, le routage dans les réseaux de capteurs peut être classé, selon la structure du réseau, en routage à plat et routage hiérarchique. Dans le routage à plat, tous les nœuds ont typiquement les mêmes rôles et fonctionnalités. Cependant, le routage hiérarchique est réalisé à plusieurs niveaux dans le sens où la vision du réseau est réduite. Certains nœuds peuvent jouer des rôles particuliers dans le réseau afin de router les informations.

Notre intérêt s'est focalisé sur les protocoles hiérarchiques. Ces protocoles, proposés à l'origine pour les réseaux filaires, sont des techniques bien connues avec des avantages particuliers liés à la scalabilité et la communication efficace. Le concept de routage hiérarchique est aussi utilisé pour assurer une efficacité énergétique dans les RCSFs. Dans une architecture hiérarchique, les nœuds qui disposent d'une ressource énergétique importante peuvent être utilisés pour traiter et envoyer les informations tandis que les nœuds d'énergie basse peuvent être utilisés pour exécuter la capture d'information dans la proximité de la cible. Le routage hiérarchique est une façon de minimiser la consommation énergétique du système en réduisant la vision globale du réseau en une vision locale dans chaque nœud. Ceci aboutit à une prolongation de la vie du réseau en entier.

1.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons pu décrire et également définir un réseau ad-hoc mais aussi les réseaux de capteurs sans fil en particulier et leurs caractéristiques. Nous avons également décrit les fonctionnalités et l'architecture du nœud capteur qui compose un réseau. Nous faisons une brève description des domaines d'applications ainsi que des projets qui ont utilisé cette technologie ces dernières années. Nous avons aussi mis l'accent sur le routage et la structuration virtuelle d'un réseau qui sont des points essentiels que nous développerons dans la suite du manuscrit. Dans la suite, nous présenterons plusieurs protocoles de routage utilisés dans les réseaux ad-hoc et de RCSF qui partagent des caractéristiques identiques. Mais également une classification de ces protocoles en tant que protocole de routage proactif, réactif et hybride.

Consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

2.1	Introduction	23
2.2	Principes des Techniques de routages	23
2.3	Les protocoles de routages proactifs	24
2.3.1	Le protocole de routage DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)	24
2.3.2	Le protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing)	24
2.3.3	LEERA (Localized energy efficient routing for wireless sensor networks)	26
2.4	Les protocoles de routages réactifs	28
2.4.1	DSR (Dynamic Source Routing)	29
2.4.2	AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)	29
2.4.3	« Energy aware routing »	31
2.4.4	EDSR (Energy-aware DSR)	33
2.5	Les protocoles de routages hybrides	35
2.5.1	Protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	35
2.5.2	Protocole ELMA (Enhanced Lifetime Maximisation Algorithm)	36
2.6	Conclusion	39

2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil, sont destinés à relever des informations dans des environnements hostiles auxquels l'homme n'a pas toujours accès. C'est pourquoi on considère qu'une fois qu'ils sont déployés, les capteurs sont autonomes. Leur durée de vie est donc la durée de vie de leur batterie. Le facteur énergie est donc au centre de toutes les préoccupations sur les capteurs : protocoles de routage « économiques », technologie sans fil adaptée, etc. Il faut minimiser les dépenses énergétiques, car l'énergie est une contrainte clé dans les réseaux de capteurs. Comme notre travail de thèse entre dans le cadre de l'étude du problème de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art des méthodes de routage qui sont utilisés dans les RCSFs et plus particulièrement ceux que nous utiliserons dans nos prochains chapitres.

2.2 Principes des Techniques de routages

La technique de routage est une méthode d'acheminement des données à la bonne destination à travers un réseau de connexion donnée. Le problème de routage au sein des RCSFs est assez complexe et cela est dû essentiellement à l'absence d'infrastructure fixe (forêt, mer, etc.), de toute administration centralisée et à d'autres défis qui doivent être vérifiés.

Le principal défi dans le routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. En effet, le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et garantit sa survie en cas un noeud ou plusieurs noeuds du réseau sont inopérants.

Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux ad hoc est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre d'unités existant dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul et de sauvegarde et de changements rapides de topologies.

Il est donc nécessaire que toute conception de protocole de routage doive étudier les problèmes suivants :

- Assurer un routage optimal.
- Minimiser la charge du réseau.
- Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables.
- Offrir une bonne qualité concernant le temps de latence. etc

Avant d'entamer la phase de conception d'une technique de routage efficace en énergie, il est nécessaire d'apporter une étude minutieuse des principaux protocoles de routages utilisés dans les RCSFs. Les différents protocoles de routage vont être découpés en trois grandes classes à savoir : les protocoles de routages proactifs, réactifs et les protocoles de routages hybrides.

2.3 Les protocoles de routages proactifs

Lorsque les noeuds de capteur sont déployés sur le terrain, aucun routage vers des noeuds spécifiques ne peut être fait. La solution pour y remédier est d'utiliser pour ce genre de réseau (le réseau ad-hoc) une technique de routage. Les protocoles de routage sont divisés en plusieurs classes. Nous allons exposer dans cette section le principe de fonctionnement des techniques de routages proactifs.

Un protocole de routage proactif permet d'établir les tables de routage avant toute chose et permet également de connaître, en tout temps, la topologie de notre réseau. Nous allons étudier certains protocoles proactifs qui permettent d'obtenir les tables de routages afin de permettre une communication entre les différents capteurs. Mais également nous ne sommes plus dans un réseau de télécommunications classiques et donc nous devons privilégier certains critères tels que la consommation d'énergie du noeud mais aussi la consommation d'énergie des noeuds dans tout le réseau.

2.3.1 Le protocole de routage DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)

Le DSDV est un protocole de routage à vecteur de distance. Chaque noeud appartenant au réseau possède une table de routage contenant tous ces noeuds voisins et également le nombre de sauts vers toutes les destinations possibles [28] [29]. Périodiquement, des diffusions sont faites pour actualiser la table de routage. Pour éviter le bouclage (loop-freedom), DSDV utilise les numéros de séquence [30] pour mettre à jour les nouvelles routes qui sont disponibles pour atteindre des noeuds cibles. Une route R est favorisée à une route R' , si R a un numéro de séquence plus grand que celui de R' . Si dans le cas où les deux ont un même numéro de séquence, alors la route possédant un minimum de saut est sélectionnée. Le numéro de séquence commence par le noeud émetteur et est incrémenté pour chaque nouvelle route trouvée. Quand le noeud trouve une actualisation vers une destination donnée, il met à jour le nombre de sauts vers cette destination et incrémente son numéro de séquence.

Les boucles de routes surviennent après un changement dans la topologie du réseau. C'est alors que l'utilisation des numéros de séquence est utile car elle rend le DSDV applicable pour une topologie dynamique du réseau. L'utilisation de mis à jour des numéros de séquence lorsque la topologie change permet au protocole DSDV d'être adaptée aux réseaux ad-hoc mobiles. En prenant en considération également que la transmission des mises à jour sont retardée, pour avoir ainsi un effet d'amortissement lorsque la topologie change rapidement.

2.3.2 Le protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing)

Le protocole OLSR est un protocole proactif à états des liens optimisé, il permet également d'avoir des routes de plus court chemin [31] [32]. Dans un protocole à état des liens, tous les noeuds déclarent ses liens directs avec tous ses voisins, par contre dans l'OLSR, les noeuds ne donnent qu'une sous-partie de leurs noeuds

voisins à l'aide de la technique des relais multipoints.

Relais multipoints

La technique des relais multipoints consiste, pour un noeud donné, d'ignorer une partie de ses liens et des ses voisins directs, qui reviennent souvent dans le calcul des routes du plus court chemin. Donc une partie des voisins d'un noeud est considéré comme intéressant. Cet ensemble de voisinage choisi de façon à obtenir le voisinage à deux sauts, est appelé ensemble des relais multipoints noté MPR sa dénomination anglophone « Multi-Protocol Router ». L'utilité de cette technique est de diminuer nettement le trafic pour la diffusion des messages de contrôle dans le réseau, mais également pour diminuer la taille du sous-ensemble des liens diffusés à tout le réseau du faites que les routes sont créés à base des relais multipoints [32].

L'idée de cette technique est de réduire l'inondation du trafic de contrôle dans un réseau en diminuant les mêmes retransmissions dans la même région. Chaque capteur dans le réseau choisit un ensemble de noeuds dans son entourage pour lesquels les messages seront transmis. Un noeud choisit ses MPRs dans son voisinage de manière qu'il soit à un saut avec un lien symétrique. Par ce choix, la zone de couverture sera de deux sauts. Les noeuds considérés comme MPR le font savoir à son voisinage par les messages de contrôle envoyés. De cette manière, un noeud capteur fait savoir au réseau qu'il a la possibilité d'atteindre des noeuds qui l'ont élu en tant que MPR. Les MPRs ont l'utilité de mettre en place des routes vers toutes les destinations possibles du réseau. En choisissant la route à l'aide des MPRs, on élimine les problèmes liés à la transmission des paquets pour les liens unidirectionnels. Tous les noeuds du réseau gardent des informations sur leurs voisins qui ont été choisis comme MPR.

Un capteur dans le réseau obtient des informations sur ces voisins grâce à des messages de contrôle reçus périodiquement. La figure 2.1 suivante fait la comparaison entre une diffusion pure et la diffusion en utilisant les MPRs. Pour la diffusion pure, dans le but d'atteindre tous les noeuds à trois sauts de la source, la diffusion à besoin de 24 retransmissions du paquet envoyé par la source. Avec l'utilisation des MPRs, il suffit de 11 retransmissions pour atteindre les noeuds à 3 sauts.

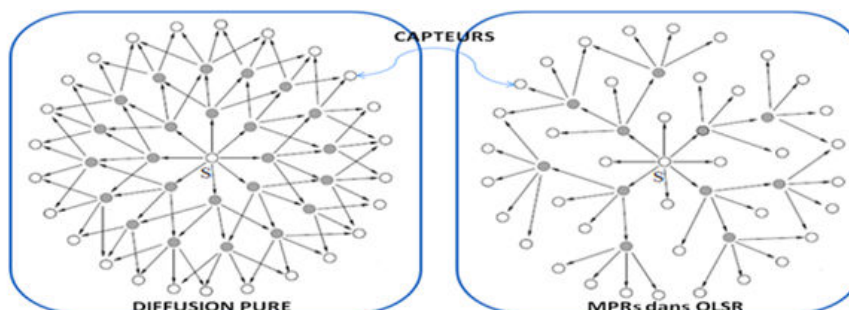


FIGURE 2.1 – Diffusion pure et diffusion en utilisant les MPRs dans OLSR.

Fonctionnement du protocole OLSR

OLSR est un protocole de routage proactif très bien adapté aux larges et denses réseaux. Dans ce protocole tous les capteurs servent en tant que routeur et chaque noeud de ce réseau garde une table de routage de toutes les entrées pour tous les autres entités du réseau. Donc lors d'envoi d'un paquet de données le noeud décide lui-même de la route la plus adaptée à prendre.

D'autres part, Dans ce type de protocole de routage les capteurs s'échangent des informations périodiquement pour obtenir les informations nécessaires au choix des relais multipoint et nécessaire également pour le calcul de la table de routage. Les noeuds envoient également des messages « *HELLO* » périodiquement pour obtenir des informations sur leur voisinage proche. Cela permet à chaque noeud de choisir son ensemble de relais multipoints.

Il y a un autre type de messages que le protocole OLSR utilise, le message TC (Topology Control). A l'aide de ce message les relais multipoints sont déclarés périodiquement dans le réseau. Ils sont diffusés en utilisant les relais multipoints et ce qui donne une diffusion contrôlée et optimisée. Les informations diffusées donnent une carte du réseau contenant tous les noeuds de celui-ci mais également un ensemble partiel des liens.

2.3.3 LEERA (Localized energy efficient routing for wireless sensor networks)

Dans le cadre de prolonger la durée de vie du réseau, une connaissance de la topologie du réseau est nécessaire mais aussi la connaissance de l'énergie résiduelle dans chaque entité du réseau est primordiale. Cela permet de router l'information tout en consommant l'énergie équitablement à travers tous les noeuds du réseau [33].

Pour permettre de connaître l'énergie résiduelle de chaque noeud, plusieurs méthodes sont utilisées. Chaque noeud peut diffuser périodiquement la quantité d'énergie disponible qu'elle possède mais cela va consommer une grosse quantité d'énergie dans tout le réseau et il y a la possibilité de connaître l'énergie résiduelle des capteurs par des méthodes d'estimations. Dans la partie suivante nous allons étudier les différentes méthodes utilisées dans le protocole de routage proactif LEERA.

Méthode sleep-wakeup (sommeil-éveil)

Un noeud sort de l'état de sommeil lorsqu'un événement se produit. Tous les noeuds du réseau possèdent deux antennes de communication. L'une d'elle permet l'échange des données et l'autre permet d'éveiller les noeuds pour communiquer des données.

Dans le protocole LEERA, il y a l'utilisation de la méthode STEM. Cette méthode utilise les messages RTS/CTS (Ready To Send/Clear To Send). Pour un simple scénario comportant trois noeuds A, B et C nous obtenons le datagramme de la figure suivante [33] :

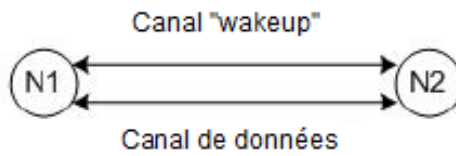


FIGURE 2.2 – Schéma de la méthode « Sleep-WakeUp ».

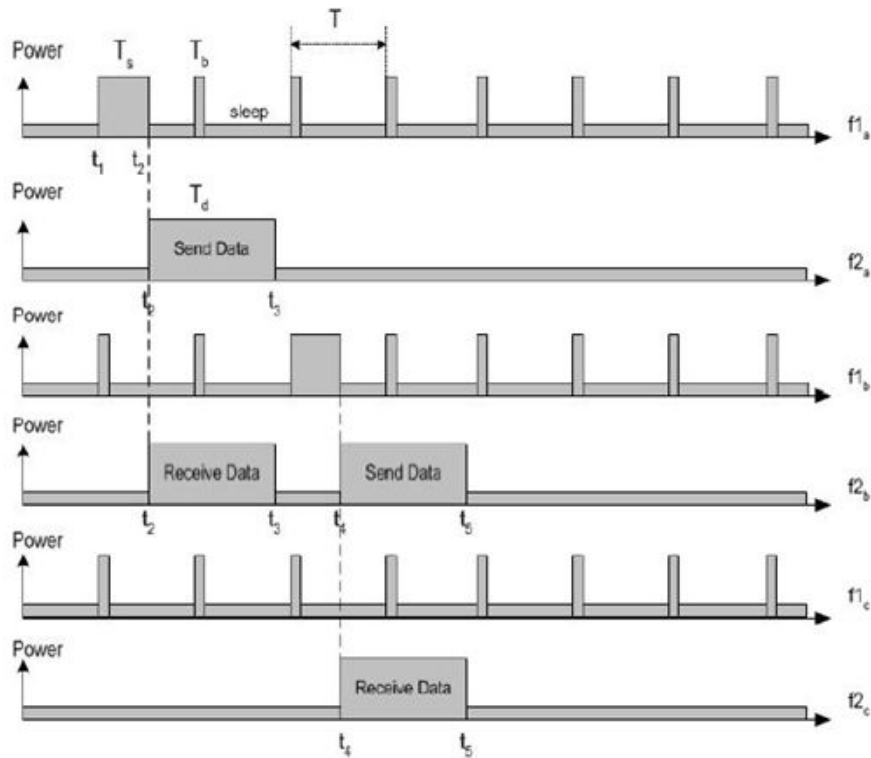


FIGURE 2.3 – Datagramme des messages RTS/CTS.

Une amélioration est apportée en utilisant le STEM pipeline (Sparse Topology and Energy Management). Cette méthode permet aux différents noeuds du réseau d'interagir entre eux simultanément. Comme le montre la figure 2.4, dès que le noeud B reçoit le message RTS, il renvoie un acquittement au noeud A mais tout en connaissant l'adresse du prochain saut, le noeud C. L'adresse est contenue dans le message « RTS » qui circule dans le réseau [33]. Le noeud C sachant qu'il est le prochain noeud se met en écoute pour recevoir les données du capteur B. Il y a alors un gain dans les attentes de délai et les délais de processus entre les nœuds du réseau.

Estimation de l'énergie résiduelle

Les décisions de routage peuvent être prises de façons locales. Ces décisions peuvent être assurées de deux façons. Soit les noeuds capteurs diffusent leur niveau d'énergie périodiquement. la deuxième alternative est de

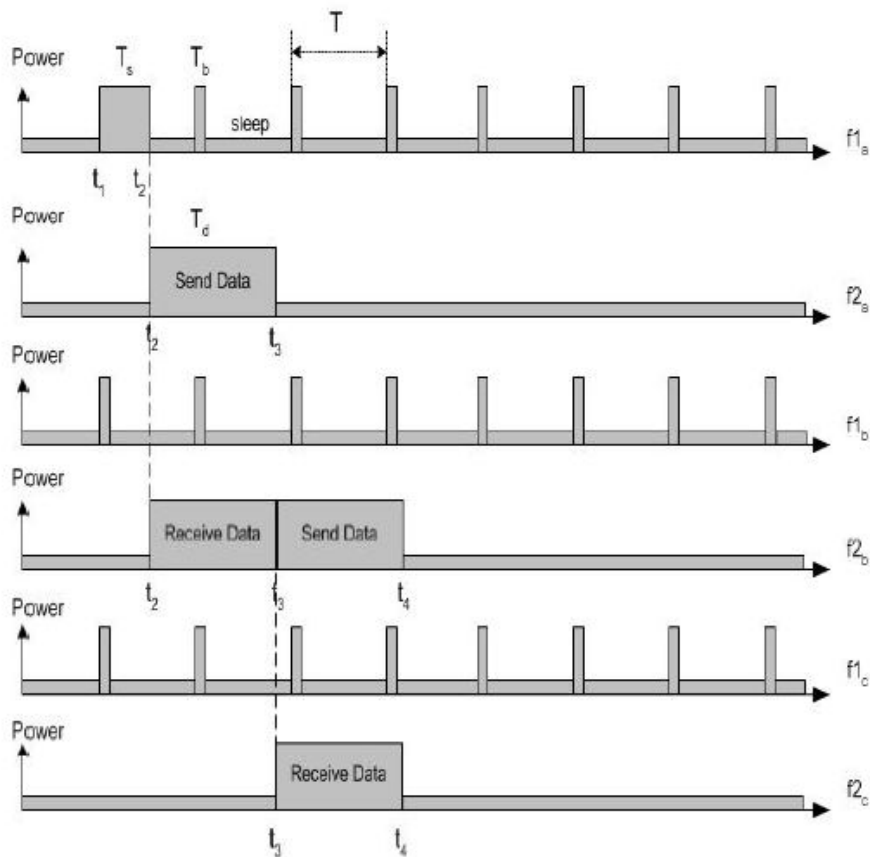


FIGURE 2.4 – Datagramme avec le STEM pipeline.

recalculer le niveau d'énergie résiduelle des noeuds expéditeurs et receveurs. En employant le mécanisme des messages RTS/CTS, tous les capteurs dans la plage de communication peuvent connaître l'énergie résiduelle car les noeuds qui transmettent connaissent les prochains sauts des paquets de données. Grâce au message RTS/CTS ils ont également l'information de la longueur du paquet de données donc le calcul de l'énergie consommée par l'expéditeur ou le récepteur peut être calculé par les formules suivantes :

$$E_{transmit} = T_d P_{transmit} \quad (2.1)$$

$$E_{receive} = T_d P_{receive} \quad (2.2)$$

2.4 Les protocoles de routages réactifs

La deuxième classe de protocole que nous allons étudier est le protocole de routage réactif. Un protocole réactif permet d'établir une table de routage lorsqu'un noeud capteur décide de transmettre des données (suite à un événement). Il n'a aucune donnée sur le réseau. Ne connaissant pas la topologie de celle-ci ni l'énergie

disponible. Le protocole réactif va permettre de rassembler les différentes données des entités du réseau pour déterminer le chemin le plus optimale à prendre afin de communiquer avec un autre noeud du réseau, ou avec le noeud puits (sink).

2.4.1 DSR (Dynamic Source Routing)

Le protocole « Routage à Source Dynamique » (DSR), est basée sur l'utilisation de la technique « routage source ». Dans cette technique : la source des données détermine la séquence complète des capteurs à travers lesquelles, les paquets de données seront envoyées [34]. en effet, Pour ce routage, les entêtes des paquets de données possèdent la séquence des noeuds à travers lesquels ils doivent passer. Donc les noeuds intermédiaires, qui se situent entre la source et la destination lors de l'acheminement des informations, garde une trace de leurs voisins intermédiaires pour pouvoir échanger les paquets de données. Bien entendu, il faut qu'également le noeud source ait besoin de connaître l'ordre complet des noeuds jusqu'à la destination.

La demande de route dans DSR se base sur la transmission des paquets *Route Request*. Lorsqu'un noeud ayant pris connaissance du paquet, il commence à chercher dans sa cachette de route (ou toutes ses routes connues sont stockées) un chemin contenant la destination demandée. Au cas ou aucune route n'est trouvée, le noeud émet le paquet *Route Request* au noeud suivant tout en lui ajoutant sa propre adresse à la séquence de noeud stocké dans le paquet *Route Request*. Et ainsi de suite, le paquet est envoyé de noeud en noeud dans le réseau jusqu'à arriver au noeud de destination où alors à un noeud ayant dans sa cachette de route la connaissance du chemin de destination. Si un chemin est trouvé, un paquet *Route Reply* possédant la séquence de noeuds pour atteindre le noeud de destination est renvoyé au noeud source [35].

Pour éviter des inondations inutiles du réseau par des messages *Route Request*, la méthode de demande de route est initialisée en questionnant le voisinage du noeud source. Cela est permis en envoyant le paquet *Route Request* avec une limite de saut égale à zéro, pour que celui-ci ne soit pas la possibilité d'être transféré aux voisins. Si aucune route n'est obtenue alors, un nouveau paquet est initialisé et diffusé dans le réseau entier.

Un noeud capteur DSR a donc la possibilité de connaître des routes en consultant des paquets qui ne lui sont pas adressés. Malgré cela, cette méthode exige un récepteur actif dans le noeud, qui va être consommatrice d'énergie. Dans les réseaux où les noeuds ont une capacité d'énergie limitée, l'objectif est de mettre en veille l'émetteur-récepteur afin de sauvegarder l'énergie le plus longtemps possible. La découverte de chemins dans le protocole DSR est illustré dans la figure 2.5 et 2.6

2.4.2 AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

Le protocole AODV représente essentiellement une amélioration de l'algorithme DSDV [29]. Le protocole AODV, réduit le nombre de diffusions de messages, et cela, en créant les routes lors du besoin, contrairement au

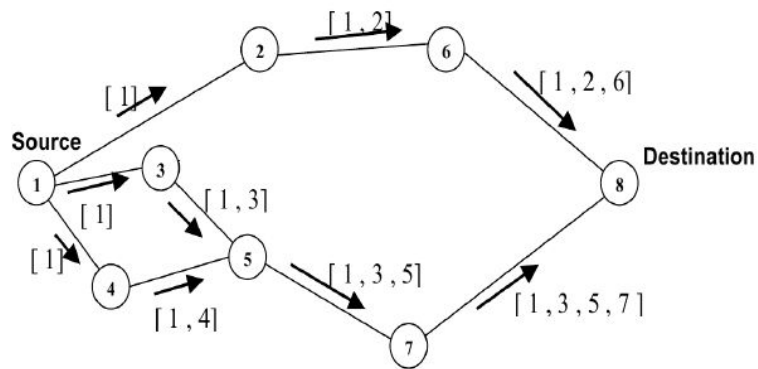


FIGURE 2.5 – Protocole DSR : Construction de la route.

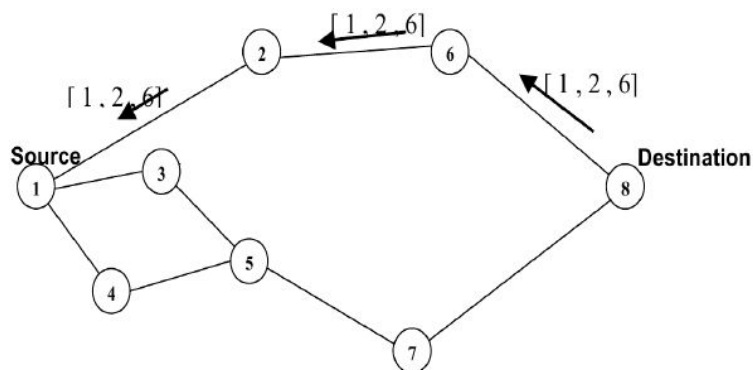


FIGURE 2.6 – Protocole DSR : Le renvoi du chemin

DSDV, qui maintient la totalité des routes. En effet, Le protocole AODV demande une route d'acheminement des données que lorsqu'il en a besoin. Il utilise les principes des numéros de séquence de la même façon que DSDV, pour éviter les boucles de routage, maintenir la consistance des informations de routage et obtenir des nouvelles routes d'acheminement des données.

Une entrée de la table de routage possède l'adresse de destination, l'adresse du noeud suivant, la distance en nombre de sauts, le numéro de séquence de destination et le temps d'expiration de chaque entrée de table. Quand un noeud ayant besoin d'envoyer des données vers une destination et dont l'entrée dans la table de routage n'existe pas ou est alors expirée, celui-ci diffuse un message de demande de route a son voisinage (RREQ : Route Request message). Pendant son acheminement dans le réseau, le message RREQ crée des entrées temporaires des tables de routage pour la route inverse des noeuds à travers lesquels il passe. Lorsque la destination ou la route d'acheminement est trouvée, la route est rendue accessible par un message RREP (Route Reply) répondant au RREQ du noeud source. Le message répondant au RREQ revient sur le chemin temporaire laissé de celui-ci. Au cours de son chemin inverse vers la source, le RREP crée des entrées pour la destination dans les tables de routage des noeuds intermédiaires. Ces entrées de routage ont une durée déterminée après

laquelle elles expirent [36].

Pour le protocole de routage AODV, les différentes phases sont en premier lieu, une diffusion dans le réseau d'une demande de route. Par la suite, le noeud de destination répond au noeud source à l'aide des informations obtenues lors de la demande de route, pour créer une route de la destination à la source. Mais nous devons prendre en compte que le protocole de routage AODV ne donne pas tout le temps le meilleur chemin possible entre la source et la destination. Le voisinage d'un noeud est détecté à l'aide de messages périodiques « HELLO ». Lorsqu'un noeud utilise un de ces voisins pour l'envoi des données, et que celui-ci ne reçoit pas le message HELLO, alors le lien est considéré comme brisé et une information de défaillance est envoyée aux voisins étant actifs. La source ayant pour connaissance du lien brisé peut choisir de stopper l'envoi des données ou de demander une nouvelle route pour acheminer ces informations, en transmettant à nouveau un message RREQ.

2.4.3 « Energy aware routing »

L'energy aware routing est un protocole qui permet de développer la survie d'un réseau pauvre en énergie. Nous parlons dans ce cas d'un protocole réactif [37] [38]. Le problème pour ce genre de protocole est qu'il utilise de l'énergie pour créer une route et cela pour chaque communication. Pour résoudre ce problème, nous proposons un nouveau protocole « energy aware routing ». Pour sa réalisation, de multiples chemins sont découverts entre le noeud source et le noeud de destination. A chaque fois, des paquets de données sont envoyées de la source à la destination, par un chemin choisi au hasard. cette technique ressemble à une diffusion (inondation). Ce type de protocole est composé de 3 phases :

Phase d'installation

Etape 1 : Le noeud de destination inonde le réseau dans la direction de la source. Il initialise également le coût du domaine avant de lancer sa requête.

$$Cost(N_D) = 0 \quad (2.3)$$

Etape 2 : Tous les noeuds intermédiaires envoient des requêtes aux voisins pour voir les noeuds qui sont les plus proches du noeud source et le plus éloigné du noeud de destination. Ainsi, un noeud N_i envoie sa demande à un noeud N_j qui satisfait les exigences suivantes :

$$d(N_i, N_s) \geq d(N_j, N_s) \quad (2.4)$$

$$d(N_i, N_d) \geq d(N_j, N_d) \quad (2.5)$$

Etape 3 : En recevant la requête, l'énergie métrique pour le voisin qui a envoyé la demande est calculée et est ajouté au coût total du chemin. Dès lors le noeud N_j calcule le cout du trajet entre N_i et N_j :

$$C(N_i, N_j) = Cost(N_i) + Metric(N_j, N_i) \quad (2.6)$$

Etape 4 : Les chemins qui ont un coût élevés sont rejetés et non ajoutés à la table de routage. Seul les voisins de N_j avec les chemins de faible coût sont ajoutés au tableau de transmission.

$$FT_j = \{i | C_{N_j, N_i} \leq \alpha(\min_k C_{N_j, N_k})\} \quad (2.7)$$

Etape 5 : Le noeud N_j assigne une probabilité à chacun de ces noeuds voisins N_i dans la table de transfert, avec la probabilité inversement proportionnelle au coût.

$$P_{N_i, N_j} = \frac{\frac{1}{C_{N_j, N_i}}}{\sum_{k \in FT_j} \frac{1}{C_{N_j, N_k}}} \quad (2.8)$$

Etape 6 : Ainsi, chaque noeud N_j a un certain nombre de voisins à travers laquelle elle peut router les paquets vers le noeud de destination. N_j alors calcule le coût moyen pour atteindre le noeud de destination en utilisant les voisins qui se trouve dans la table de routage.

$$Cost_{N_j, N_i} = \sum_{i \in FT_j} P_{N_j, N_i} C_{N_j, N_i} \quad (2.9)$$

Phase de communication des données

Etape 1 : Le noeud source envoie le paquet de données à un voisin quelconque se trouvant dans sa table de routage, avec la probabilité du voisin choisi égale à la probabilité dans la table de transfert.

Etape 2 : Chacun des noeuds intermédiaires transmet les paquets de données à un voisin chois au hasard dans la table de transmission, avec la probabilité du voisin choisie étant égale à la probabilité du tableau de transmission.

Etape 3 : On continue jusqu'à ce que le paquet de donnée arrive au noeud de destination.

Phase de maintenance

La phase de maintenance des chemins permettant une réception des données des plus optimales des données reste à un niveau minimal.

Nous pouvons en conclure que ce protocole de routage est approprié à la consommation d'énergie et le faible débit du réseau. L'idée de ce protocole est très simple, les chemins d'accès utilisant le moins d'énergie n'est pas nécessairement le meilleur pour la santé à long terme du réseau. En utilisant un mécanisme plus

simple pour l'envoi des paquets de données dans le réseau permet de gérer plus équitablement les ressources de chaque noeud du réseau.

2.4.4 EDSR (Energy-aware DSR)

Actuellement, dans le réseau ad hoc, l'algorithme de routage à propos de l'énergie « Energy-aware DSR » propose deux idées :

- Envoyer des données en consommant le moins d'énergie possible.
- Faire en sorte de prolonger la durée de vie du réseau le plus longtemps possible.

On propose de modifier le protocole de routage classique DSR, en retenant le mécanisme de routage DSR-demand.

Lorsque l'on va choisir une route on prend en compte le minimum de saut possible mais également la consommation d'énergie des noeuds par lesquelles vont être traversées les données ainsi que l'énergie encore disponible à travers le réseau.

On propose un routage basé sur le facteur de priorité dynamique, en essayant de consommer le moins d'énergie possible et en utilisant la capacité des états de liens entre les noeuds.

- **Methode Ad hoc**

On suppose que les données passent par n_1, n_2, n_3 jusqu'à n_k , avec n_1 représente le noeud de source et n_k le noeud de destination. L'expression de l'énergie consommée pour envoyer des données du noeud « a » au noeud « b » est notée $T(ab)$. Dès lors, toute l'énergie consommée lors de la traversée des données à travers le réseau est :

$$e = \sum_{i=1}^{k-1} T(n_i, n_{i+1}) \quad (2.10)$$

- **Optimisation des liens d'énergies**

Le modèle de la consommation d'énergie est :

$$u(d) = ad^\alpha + c \quad (2.11)$$

Avec, $u(d)$ représente la distance entre les noeuds α et c sont des constantes.

Un algorithme « greedy » pour sauvegarder l'énergie en considérant que le noeud émetteur connaît la position du noeud récepteur, nous obtenons comme formule :

$$d \leq \alpha \sqrt{\frac{c(1 - 2^{1-\alpha})}{a}} \quad (2.12)$$

Il s'agit du minimum de puissance pour une transmission directe.

- **Le facteur de la priorité des liens**

Dans une topologie réseau, il y a plusieurs chemins du noeud source au noeud de destination. Nous obtenons la consommation d'unité d'énergie pour chaque route en la calculant. Nous assignons un facteur de priorité dynamique. Le changement de β se fait suivant la formule suivante [39] :

$$\beta = \left(\frac{c}{\frac{me}{\pi}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Avec,

- c : la capacité du lien de routage
- e : l'expression de l'énergie consommée par le lien
- m : le nombre de paquet de données envoyées.
- π : le nombre de noeuds traversés par ces paquets.

Cela nous donne $c/(me\pi)$ qui nous permet de choisir la plus grande capacité de lien avec une faible consommation d'énergie. Cette stratégie nous permet d'avoir une consommation d'énergie équitable sur tout le réseau, et par la suite une durée de vie du réseau plus longue.

• Les étapes de l'algorithme EDSR

Etape 1 : Utilisation du protocole de routage DSR pour trouver le chemin $p_1 p_2, \dots, p_k$, et maintenir en état le routage de l'information.

Initialisation

Etape 2 : Tandis que le routage $P_i, i = 1, 2 \dots k$ faire :

Etape 3 : Optimisé l'énergie de liaison P_i ,

Etape 4 : Calculer la capacité C_i de lien P_i ,

Etape 5 : Calculer la consommation unitaire d'énergie unitaire e_i ,

Etape 6 : Calculer le P_i et le facteur de priorité β_i ,

Etape 7 : L'acheminement suivant P_{i+1}

Choix du routage EDSR

Etape 8 : tandis que S a des données à envoyés faire

Etape 9 : Par rapport à β , sélectionner le lien de routage P_i avec le facteur de la plus haute priorité β_i ,

Etape 10 : Si $e_i \leq c_i$

Etape 11 : Mise en oeuvre du transfert sur P_i ,

Etape 12 : $c_i \leftarrow c_i - e_i$

Etape 13 : Calcul du cumul de l'énergie dépensée,

Etape 14 : Calcul du nombre de routes restantes et du nombre de noeuds restants,

Etape 15 : Nouvelle direction de routage, retour à l'étape 1.

Pour ce protocole, il y a eu quelques améliorations par rapport au protocole de routage DSR originale. Ceci est une nouvelle stratégie de routage EDSR. A travers l'optimisation des liens, et les facteurs de priorité dynamique

pour le choix des chemins, nous arrivons à l'objectif de préserver l'énergie des noeuds et donc de la vie du réseau [39].

2.5 Les protocoles de routages hybrides

Ces protocoles combinent les propriétés de base des deux premières classes de protocoles, en un seul. Autrement dit, ils sont à la fois réactifs et proactifs. Les protocoles hybrides [40] sont utilisés dans un réseau découpé en zone. Ils emploient un protocole proactif dans la zone et un protocole réactif pour les communications interzones [41].

Quand un réseau est constitué de milliers de capteurs, la gestion de l'acheminement des données entre les différents capteurs est coûteuse dans le domaine énergétique et en capacité de stockage. Dans la technique de clustering, les données ne sont pas transmises directement à la station de base mais au ClusterHead (CH) correspondant. A partir de là, le ClusterHead transmet toutes les données agrégées à une station de base distante. Alors nous pouvons en déduire que les ClusterHead reçoivent et transmettent le plus de données dans un cluster est en proie à une grande consommation d'énergie. Donc il est nécessaire de mettre en place des techniques permettant d'éviter à un ClusterHead de consommer sa capacité énergétique totale.

Pour être utilisé, cette technique de partitionnement en plusieurs zones, confère aux noeuds deux tables de routages. La première table aura pour objectif d'acheminer les données à l'intérieur de la zone. Et la deuxième table aura pour but de router les données entre les différentes zones du réseau. Cette deuxième table de routage est utilisée par les noeuds qui sont aux frontières des différentes zones. Ces derniers joueront le rôle de « Gateway » (portes, relais) entre les différentes zones du réseau. La figure suivante donne un exemple la technique de partitionnement en zones dans un réseau de capteurs et l'acheminement d'information entre deux noeuds se situant dans des zones différentes.

2.5.1 Protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Pour le routage dans les réseaux de capteurs homogènes, un clustering distribué nommé LEACH a été proposé par Heinzelman et al [42]. Cette algorithm choisit aléatoirement les noeuds qui vont être des CHs et donne ce rôle aux différents noeuds suivant la méthode Round-Robin (tourniquet). Cette méthode permet de garantir une consommation de l'énergie équitable entre tous les noeuds d'un même cluster. De plus, afin de minimiser la quantité de données transmises à la station de base, les ClusterHead agrègent les informations recueillies par les noeuds membres qui sont dans le même cluster, et envoient un paquet agrégé à la station de base. Le protocole LEACH se compose de deux phases à savoir : la phase *Set-up* dans laquelle les ClusterHeads sont choisis et les clusters du réseau sont créés. Et la deuxième phase appelée *Steady State* durant laquelle le transfert des données sont envoyés à la station de base. Malgré cela, le protocole de routage

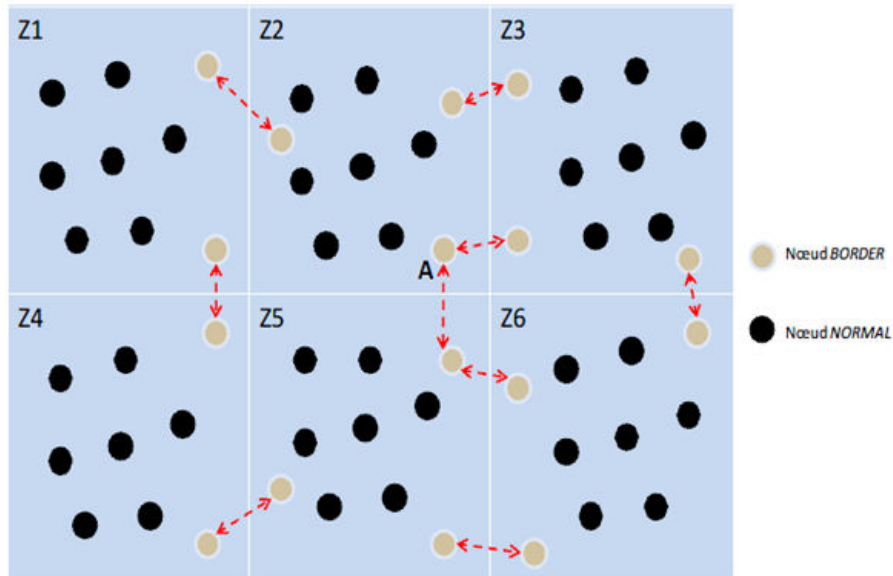


FIGURE 2.7 – Schématisation des zones pour un protocole de routage hybride.

LEACH bien qu’il puisse allonger la durée de vie du réseau, celui-ci à certaines limites.

Le protocole considère que tous les noeuds du réseau peuvent transmettre des données avec une puissance maximale pour pouvoir atteindre la station de base et que tous les noeuds ont une puissance de calcul permettant de supporter les différentes couches MAC. Donc le protocole LEACH [43] ne correspond pas aux réseaux de très envergure pouvant être déployé sur de grandes zones. D’autre part, le protocole LEACH choisit aléatoirement les ClusterHeads et ne pose aucune contrainte sur leur distribution ainsi que sur leur niveau d’énergie. Nous pouvons trouver par conséquent des noeuds étant isolés. Dans le protocole LEACH, il y a un rassemblement des données qui est centralisé et se lance périodiquement. Mais il existe des cas où la transmission périodique des données peut ne pas être négligée car cela épuise rapidement l’énergie des capteurs.

2.5.2 Protocole ELMA (Enhanced Lifetime Maximisation Algorithm)

Un nouvel algorithme de routage ELMA [44] (algorithme pour maximiser l’amélioration d’une durée de vie) avec trois versions différentes. Cet algorithme essaie de répartir les charges du trafic sur l’ensemble du réseau et évite ainsi l’épuisement de l’énergie sur l’ensemble des trajets du réseau. L’un des points principaux de recherche sur les réseaux de capteurs sans fil est le grand nombre de protocole de routage. LEACH est une sorte d’algorithme de routage hiérarchique basé sur le concept de regroupement. Dans cet algorithme, les noeuds sont classés en différents groupes et dans chaque groupe, l’un des noeuds est sélectionné au hasard pour être le chef du regroupement (cluster) pendant un certain temps. Pour équilibrer la consommation d’énergie des noeuds, le rôle d’un chef de groupe est remis au hasard parmi tous les membres de chaque groupe. Tous les

noeuds d'un cluster à l'exception du chef peuvent envoyer des données au noeud puits (Sink) via le chef du groupe.

Dés lors, la transmission se fait par saut unique à partir des chefs de groupe au noeud puits. La grosse consommation en puissance énergétique rend l'algorithme pratique quand il s'agit d'un réseau à grande échelle. On a proposé le protocole multi-hop LEACH. Dans ce protocole, il est supposé que la communication entre le chef du groupe et le puits utilise plusieurs sauts au lieu d'un seul bond comme le modèle LEACH. Le LMAWSN a été proposé par Zytoune, Fakhri et Aboutajdine en 2010. Cet algorithme prend en considération deux paramètres pour sélectionner un chemin avec une énergie de transmission minimum tandis que son objectif global est de répartir les couts de transport d'énergie sur l'ensemble des noeuds du réseau. Pour y parvenir, un noeud est autorisé à transmettre des données uniquement lorsque son énergie est supérieure à l'énergie moyenne du réseau. Afin de calculer, l'énergie moyenne du réseau, chaque noeud diffuse périodiquement un paquet contenant son énergie résiduelle.

- **Terminologies**

Nous commençons par donner quelques définitions sur les termes utilisées :

- Neighbors Nodes : Tous les noeuds qui peuvent communiquer entre eux.
- Active Nodes : Les noeuds actifs sont des noeuds qui sont en « éveil z ». Ils sont sensibles à l'environnement (sensibles aux différents événements dans leur environnement), envoie les données aux voisins.
- Idle mode : Les noeuds « ralentis » ne peuvent pas envoyer des données aux noeuds adjacents. Alors la consommation de l'énergie des noeuds « ralenti » est inférieure à celle des noeuds actifs.
- Network lifetime : Commence à partir du moment que le premier noeud n'a plus d'énergie.

L'algorithme proposé de la maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteur, ELMA, et ses variantes sont basées sur l'équilibrage de la consommation d'énergie des noeuds en se concentrant sur la construction de la route entre les noeuds de capteur et le puits.

Le travail effectué utilise la recherche de plusieurs chemins (multi-path fading) noté « mp » et le modèle des canaux libres « fs ». Lorsque la distance entre le noeud transmetteur et le noeud receveur dépasse le seuil de distance d_0 le modèle des canaux libres est utilisé sinon le multi-path fading est appliqué. le paramètre d_0 est donné par l'équation suivante :

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (2.14)$$

L'énergie qui va être dépensée par le noeud transmetteur est donnée par : {

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} k E_{elec} + k E_{fs} d^2 & \text{si } d < d_0 \\ k E_{elec} + k E_{mp} d^4 & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Avec, k : Message de taille k bit. E_{elec} : Energie électronique de la radio. $E_{fs} d^2$ et $E_{mp} d^4$: Energie amplifiée.

D'autre part, l'énergie consommée par le noeud récepteur est :

$$E_{rx}(k) = k E_{elec} \quad (2.16)$$

• La famille d'algorithmes ELMA

Le principe et l'objectif de l'algorithme ELMA est d'une part une consommation équitable de l'énergie entre les noeuds du réseau et d'autre part la construction d'une route entre le noeud source et le noeud de destination « puits » (sink). Ils se composent de 5 phases : -

- Estimation moyenne de l'énergie (Average energy estimation).
- Détection de l'environnement (Sensing the environment)
- Requête de route (Route request)
- Réponse de route (Route reply)
- Transmission des données (des informations). (Data transmission)

De plus, l'algorithme ELMA utilise 4 types de paquets :

- Requête de route
- Réponse de route
- Paquet d'énergie (résiduel)
- Paquet de donnée

• Estimation moyenne de l'énergie

Chaque noeud du réseau envoie périodiquement le niveau d'énergie restant, grâce aux paquets d'énergie. Tous les noeuds recevant des paquets d'énergie peuvent calculer ou estimer l'énergie résiduelle du réseau. Dans le travail effectué, nous considérons que les noeuds possédant une énergie supérieure à l'énergie moyenne du réseau sont considérés comme des noeuds actifs sinon ils sont considérés comme des noeuds ralentis.

• Requête de route

Chaque noeud du réseau envoie périodiquement au noeud voisin des paquets de requête de route. Dans celle-ci est ajouté l'ID du noeud mais également un numéro de séquence du noeud source. Dans cette partie, si un noeud reçoit le même paquet par un autre noeud voisin, celui-ci est négligé et donc cela permet d'éviter la création de boucles dans le réseau.

Nous pouvons avoir des paquets de requête de route qui peuvent s'éloigner du noeud de destination. Un contrôle de sauts de ces paquets permet d'éviter cela. De plus, seul les noeuds actifs ont la possibilité de transmettre les paquets.

• Réponse à la requête

Dans cette partie, le noeud attend une période pour recevoir les paquets de requête de route, et choisit la meilleure route possible par rapport à une fonction d'efficacité. Les procédures du noeud évier lorsqu'il reçoit les paquets de requête de routes sont basées sur deux paramètres. Le numéro de séquence et une fonction

d'efficacité. Le noeud puits envoie un paquet réponse de requête pour chaque numéro de séquence. Pour une séquence unique, la route est choisie selon le rapport d'efficacité définie par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{E_{total}}{Hop^\alpha} \quad (2.17)$$

Avec,

E_{total} : représente l'énergie totale de la route.

Hop : représente le nombre de noeud se trouvant sur cette route.

α : est une variable définie comme $1 \leq \alpha \leq 2$.

Après avoir définie le meilleur chemin. Une réponse de requête (route reply) est envoyée au noeud source.

• Transmission des données

Après avoir choisi le meilleur chemin. Le noeud source recevant les paquets de réponse de requête peut à son tour calculer le nombre de paquets qui peuvent être envoyés par cette route, en utilisant la fonction de capacité du chemin. Cette fonction est définie par l'équation suivante :

$$\Phi_p = \frac{E_{min}}{E_{TH}} \quad (2.18)$$

Avec,

E_{min} étant l'énergie de consommation la moins élevée utilisée par le noeud sur cette route.

E_{TH} est le seuil de viabilité.

Le protocole de routage appartient à une famille d'algorithmes de routage qui optimise la durée de vie d'un réseau, ainsi que le nombre de paquets reçus par le noeud puits. Les algorithmes ELMA s'appliquent à équilibrer les techniques d'estimation moyenne de l'énergie dans un réseau.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu énumérer certains protocoles de routages existants les plus connus et les plus cités. Le groupement de ces protocoles ont été classés suivant trois grandes familles auxquelles on peut les associer. C'est-à-dire les protocoles de routage proactifs, réactifs et hybrides. Chacune de ces familles possède des avantages et des inconvénients qui vont de pair. Pour parvenir à différencier les bonus et malus de chaque protocole de routage, nous devons mettre l'accent sur les métriques à étudier pour parvenir à un classement des protocoles viables à l'optimisation de l'énergie. Nous pourrions ainsi utiliser des bribes de ces protocoles pour ainsi parvenir à trouver un protocole servant comme modèle à l'optimisation de l'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil.

Mais avant de pouvoir amener ce projet à terme, il est indispensable de s'intéresser aux fonctionnements de la consommation énergétique d'un capteur dans les différentes phases de son utilisation au sein d'un réseau.

L'étude de la consommation énergétique est inévitablement liée aux fonctionnements de la communication se déroulant entre les capteurs ainsi que de l'utilisation du module radio d'un noeud. Mais avant de pouvoir amener ce projet à terme, il est indispensable de s'intéresser aux fonctionnements de la consommation énergétique d'un capteur dans les différentes phases de son utilisation au sein d'un réseau. L'étude de la consommation énergétique est inévitablement liée aux fonctionnements de la communication se déroulant entre les capteurs ainsi que de l'utilisation du module radio d'un noeud.

Le module RF et la consommation énergétique

Sommaire

3.1 Introduction	42
3.2 Le simulateur Network Simulator 2	42
3.2.1 Présentation	42
3.2.2 Les agents et les applications	42
3.2.3 Le modèle énergétique	43
3.3 La couche liaison	44
3.3.1 Rôle de la sous-couche MAC	45
3.3.2 Critères de performances des mécanismes d'accès au canal	46
3.3.3 Efficacité des stratégies de mise en veille	47
3.4 Le modèle de portée de transmission	48
3.4.1 La couche réseau	48
3.4.2 Modèle de propagation	49
3.5 Les résultats obtenus pour les modèles énergétiques	51
3.5.1 Les métriques utilisées	51
3.6 Simulations et résultats	52
3.6.1 Consommation énergétique	53
3.6.2 Rapport de paquet reçus	53
3.6.3 Délai de transmission et nombre de paquets perdu	54
3.6.4 Débit	54
3.7 Conclusion	55

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux fonctionnements de la consommation énergétique d'un capteur sans fil dans les différentes phases de son utilisation au sein d'un réseau. L'étude de la consommation énergétique est inévitablement liée aux fonctionnements de la communication se déroulant entre les capteurs ainsi que de l'utilisation du module radio d'un noeud. L'utilisation se fera grâce à un simulateur de réseau NS2 (Network Simulator 2) ou l'on expliquera son fonctionnement et l'utilisation de ce simulateur.

3.2 Le simulateur Network Simulator 2

3.2.1 Présentation

Le simulateur NS couvre un large nombre d'applications, de protocoles, de types de réseau, d'un ensemble d'éléments du réseau ainsi que des modèles de transmissions. Nous appellerons cela des « objets simulés ».

Le simulateur est basé sur deux langages de programmation : un simulateur orienté objet, écrit en C++, et l'interpréteur OTcl (une extension au Tcl) utilisé pour l'exécution des scripts de l'utilisateur. Le NS possède une vaste librairie sur les réseaux ainsi que protocoles. Il y a deux classes de hiérarchie : La hiérarchie du compilateur C++ et celle de l'interpréteur OTcl [45].

L'utilisation du compilateur C++ nous permet d'obtenir une efficacité et une rapidité d'exécution lors des simulations. Cela est particulièrement utile lors de simulations détaillées ainsi que pour les opérations sur les protocoles. Cette particularité nous permet de réduire le temps des processus engagés lors des simulations.

Alors que le script écrit en OTcl, va définir les particularités et détails de la topologie du réseau, les spécificités des protocoles et des applications que nous souhaitons simulés (dont le comportement est déjà défini dans la hiérarchie compilée). OTcl peut utiliser les objets compilés du C++ à travers les liens OTcl.

NS est un simulateur à évènements discrets, ou l'avancement de la simulation dépend de la chronologie des évènements qui sont maintenues par un ordonnanceur. Un évènement est un objet dans la hiérarchie C++ avec un identifiant unique, une heure programmée et le pointeur à un objet gère l'évènement. L'ordonnanceur conserve une structure de données ordonné (il y en a quatre, mais par défaut, NS utilisent une liste chaînée simples) avec les évènements à exécuter un par un, grâce à un gestionnaire d'évènement.

3.2.2 Les agents et les applications

Après avoir définie la topologie de notre réseau (noeuds et liens) nous pouvons décrire le flux de transmission utilisées lors de la simulation. Nous définirons alors le routage (en particulier les noeuds sources et les points de collecte) les agents (les protocoles) et les applications qui seront utilisées.

Pour poursuivre notre exemple, nous allons nous intéresser à l'exécution de l'application FTP (File Transfer Protocol). Le FTP est utilisé par le noeud de destination pour avoir une connaissance des paquets qui ont été bien reçus. Les paquets perdus sont signalés, car le TCP utilise des liens bi-directions afin d'obtenir un retour avec le noeud source. Il existe de nombreuses variantes au protocole TCP, tel que Tahoe, Reno, Newreno, Vegas.

L'utilisation dans le script du protocole TCP permet de définir une connexion sur le comportement du noeud de destination et assigne à celui-ci un point de collecte. Nous notons que dans la technique TCP, le noeud de destination a un rôle actif dans le protocole de générer des accusés de réception, afin de garantir que tous les paquets arrivent à destination.

3.2.3 Le modèle énergétique

Nous allons voir dans cette partie les différents modèles énergétiques que nous pouvons avoir dans les réseaux de capteurs sans fil ainsi que celui le plus approprié dans les différentes simulations que nous avons pu faire.

Dans les capteurs sans fil, l'énergie est consommée principalement par le module de communication (transmetteur/récepteur), ainsi que par les modules de détection et de traitement. Nous considérons que le circuit du transmetteur du capteur sans fil opère suivant trois modes.

En effet, lorsque l'information est envoyée par le capteur, ce dernier est en mode communication, d'où tous les modules de celui-ci sont actifs. Par contre, si aucune communication des données n'est en cours, le capteur sera en mode « sommeil ». Dans cet état le capteur se soucie que de l'écoute et de la détection. Cette stratégie permet de réduire la consommation de l'énergie.

Nous considérerons alors que l'énergie consommée par les modules de détection ainsi que celle du traitement ne seront pas prises en compte car elles sont relativement négligeables par rapport à l'énergie consommée par le module de communication.

Nous prendrons comme modèle la formule suivante :

$$E_{tot-c}(s) = E_{c-sens} + E_{c-proc} + E_{c-com} \quad (3.1)$$

Avec,

- E_{c-sens} représente l'énergie consommée durant le processus de détection.
- E_{c-proc} représente l'énergie consommée durant le processus de processing.
- E_{c-com} représente l'énergie consommée durant le processus de communication.

Pour simplifier, nous pouvons considérer que :

$$E_{tot-c}(s) \approx E_{c-com}(s) \quad (3.2)$$

Durant notre étude, nous considérons le modèle énergétique suivant :

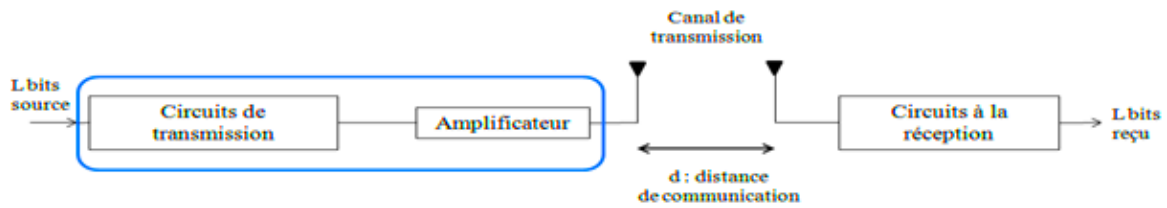


FIGURE 3.1 – Circuit de la transmission des données.

La consommation totale de l'énergie est par le processus de communication est decrite par la formule suivante :

$$E_{tot-c}(s) = E_{Tx}(L, d) + E_{Rx}(L, d) \quad (3.3)$$

Avec,

- E_{Tx} représente l'énergie consommée lors du processus de transmission.
- E_{Rx} représente l'énergie consommée lors du processus de réception.
- L représente le nombre de bits envoyés.
- d représente la distance séparant le transmetteur et le récepteur.

L'expression de chaque terme est présenté par les euqations suivantes :

$$\begin{aligned} E_{Tx}(s) &= E_{circuit} L + K_{Amp} L d^\lambda \\ E_{Rx}(s) &= E_{circuit} L \end{aligned} \quad (3.4)$$

Avec,

- $E_{circuit}$ représente l'énergie consommée par les circuits électroniques du capteur.
- k_{Amp} représente le coefficient d'amplification pour la transmission.
- λ représente le coefficient d'atténuation.

3.3 La couche liaison

La couche liaison est composée de deux sous-couches : les sous-couches MAC et LLC. La sous-couche LLC a pour rôle de détecter les erreurs des données binaires issues de la couche physique. En pratique, il est courant d'utiliser un code cyclique redondant (CRC) pour vérifier l'intégrité des données reçues. Son analyse n'est pas traitée dans cette thèse. En revanche, la sous-couche MAC a un impact considérable sur la consommation énergétique globale d'un réseau de capteurs, notamment via la mise en oeuvre des stratégies d'allocation du canal et de mise en veille [46].

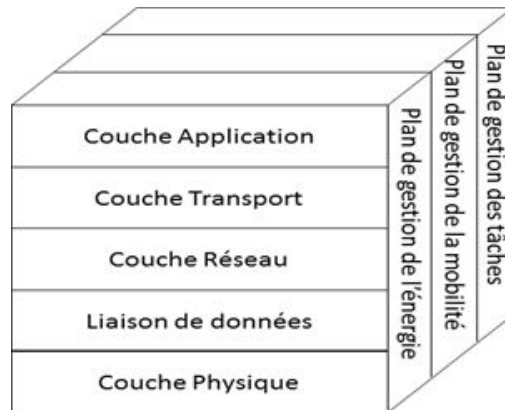


FIGURE 3.2 – Pile protocolaire d'un capteur sans fil.

3.3.1 Rôle de la sous-couche MAC

La sous-couche MAC a pour rôle de mettre en oeuvre trois types de mécanismes :

Les mécanismes d'accès au canal Ces mécanismes doivent permettre de gérer le contrôle de l'accès et du partage du canal entre les différents noeuds qui désirent communiquer dans un réseau. Nous verrons par la suite que cette gestion de l'accès au canal peut être réalisée de manière centralisée ou distribuée.

Les stratégies de mise en veille des capteurs

Ils ont pour objectif de réduire la consommation d'énergie. Il est en effet essentiel qu'entre deux communications un capteur soit mis en veille afin de préserver l'état de charge de sa batterie. De plus, ces stratégies sont indissociables des mécanismes d'accès au canal. Leur définition impacte directement le comportement des mécanismes d'accès et réciproquement.

Les trames de communications.

Ces trames définissent la mise en forme syntaxique des données issues de la couche physique. Elles permettent entre autre d'initier les communications entre les entités, de gérer les modes de communications ou encore de détecter les éventuelles erreurs introduites par le canal de propagation. Leur mise en oeuvre passe généralement par l'insertion de diverses informations (bits additionnels, entêtes, somme de contrôle...) nécessaires au récepteur pour déterminer le début et la fin d'une trame ou chaque champ utile qui la compose (adresse, données, champs de synchronisation). La détection des erreurs introduites par le canal est quant à elle généralement réalisée via une somme de contrôle (checksum en anglais) qui est insérée par l'émetteur et ensuite vérifiée par le récepteur via la couche LLC.

A travers la description des différents mécanismes mis en oeuvre par la couche MAC, il apparaît clairement que les protocoles MAC jouent un rôle central sur la consommation énergétique globale d'un réseau et plus particulièrement dans un réseau de capteurs.

3.3.2 Critères de performances des mécanismes d'accès au canal

Dans un contexte de réseau de capteurs, les protocoles MAC ont l'obligation d'être efficaces d'un point de vue énergétique. Ils doivent pour cela prendre en considération tous les événements possibles rencontrés lors d'une communication radio et qui peuvent être des sources de consommation supplémentaire. L'efficacité d'un protocole MAC repose donc sur la minimisation des principales sources de dépense d'énergie que sont :

L'écoute passive :

C'est un phénomène qui intervient lorsqu'un noeud écoute le canal et se trouve en attente de réception. Dans le cas d'une allocation dynamique du canal, ce phénomène sera généralement mitigé en ajustant les modes de fonctionnement (et donc de consommation) des capteurs. Ce phénomène est encore mieux géré avec une allocation statique du canal. Dans ce cas précis, la bande allouée (fréquence, temps, code) au capteur garantit une transmission utile.

Les collisions : Elles apparaissent lorsqu'au moins deux noeuds voisins (à portée de transmission) désirent transmettre simultanément. Dans ce cas précis, les noeuds sont dans l'obligation de retransmettre leurs données ce qui induit une consommation énergétique supplémentaire. Les protocoles MAC basés sur une allocation dynamique du canal sont susceptibles de subir ce phénomène alors qu'il est inexistant dans le cas d'une allocation statique du canal.

Le surcoût d'écoute :

Il représente la consommation supplémentaire d'un noeud lors de la réception de paquets qui ne lui sont pas destinés (mode multi-sauts) ou redondants (type broadcast). Ce phénomène intervient principalement dans les réseaux ad-hoc. Lors d'une allocation dynamique du canal, les noeuds peuvent éteindre leur radio durant le temps restant de la transmission si le paquet ne leur est pas destiné. Une allocation statique du canal élimine totalement ce problème puisque les noeuds écoutent le canal dans des intervalles de temps ou de fréquence spécifiques.

Le surcoût lié au protocole : Il représente la consommation liée à l'utilisation des différentes trames de contrôle pour réserver le canal, confirmer une bonne réception, ou encore synchroniser les noeuds du réseau. Elles sont nécessaires à la gestion du réseau mais ne contiennent aucune donnée utile et peuvent dans certains cas augmenter considérablement le trafic et la latence. Une étude menée [47] a montré que l'utilisation de la trame RTS/CTS nécessite une augmentation de la capacité du canal à hauteur de 40% à 75%. Dans l'optique de réduire la consommation, il est nécessaire de minimiser ces mécanismes de gestion du réseau.

La synchronisation d'événements :

C'est un phénomène qui peut être considéré comme source de dépense d'énergie. En effet, lorsqu'un événement se produit dans une région du réseau, les noeuds proches de cette région vont détecter cet événement pratiquement en même temps et, par la même occasion, seront tentés d'émettre simultanément, augmentant

ainsi le risque probable de collisions. Ce phénomène n'est cependant un problème que pour les protocoles basés sur une allocation dynamique du canal et peut être mitigé par l'utilisation de mécanismes d'agrégations ou de suppression de corrélation des données.

3.3.3 Efficacité des stratégies de mise en veille

L'évolution des technologies lors de ces dernières années, tels que les puces radios et les microcontrôleurs qui possèdent plusieurs modes de fonctionnement avec plusieurs modes de consommation. Dans la plupart des cas (c'est-à-dire entre deux mesures ou deux transmissions) un réseau de capteurs ne fait rien. Alors la nécessité d'avoir un cycle de veille est important afin de réduire leur consommation énergétique moyenne.

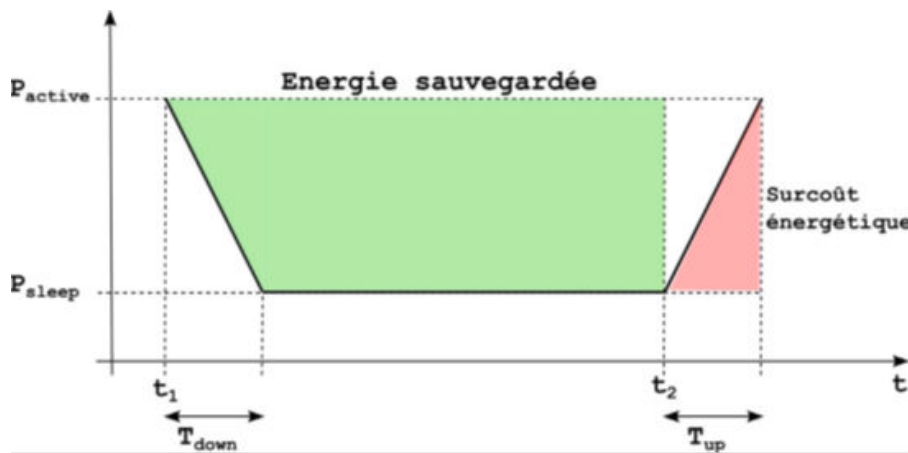


FIGURE 3.3 – Représentation de l'énergie sauvegardée par la stratégie de mise en veille.

A l'instant t_1 , la décision du noeud de passer en mode veille est prise. La consommation énergétique passe de P_{active} à P_{sleep} . A l'instant t_2 , il y a alors apparition d'un événement qui permet la décision de remettre le noeud en mode actif. L'énergie totale consommée en mode veille est donc égale à :

$$E_{active} = P_{active}(t_2 - t_1) \quad (3.5)$$

Il faut un temps T_{down} pour mettre le capteur en mode veille. Durant cette phase de changement de mode et pour simplifier la démonstration, on suppose que la puissance consommée est égale à :

$$P = \frac{P_{active} + P_{sleep}}{2} \quad (3.6)$$

Ensuite, P_{sleep} est consommée jusqu'à t_2 . Au total, l'énergie en mode veille est donc égale à :

$$E_{sleep} = \frac{P_{active} + P_{sleep}}{2} T_{down} + (t_2 - t_1 - T_{down})P_{sleep} \quad (3.7)$$

L'énergie sauvegardée s'exprime donc par l'équation :

$$E_{sauvegarde} = P_{active}(t_2 - t_1) - \frac{P_{active} + P_{sleep}}{2} T_{down} + (t_2 - t_1 - T_{down})P_{sleep} \quad (3.8)$$

Par contre, une quantité d'énergie supplémentaire est consommée lors du réveil du capteur :

$$E_{surcout} = T_{up} \frac{P_{active} + P_{sleep}}{2} \quad (3.9)$$

Pour que l'utilisation de ce type de mode de fonctionnement soit efficace, il faut donc que l'énergie dépensée pour le réveil soit inférieure à l'énergie sauvegardée, soit : $E_{surcout} < E_{sauvegarde}$ ou bien alors que le temps avant l'occurrence d'un évènement soit égal à l'équation suivante :

$$(t_2 - t_1) > \frac{1}{2} \left(T_{down} + \frac{P_{active} + P_{sleep}}{P_{active} - P_{sleep}} T_{up} \right) \quad (3.10)$$

En réalité, on sait que pour s'activer depuis l'état de veille, l'architecture radio passe par différentes étapes :

Ū

- Démarrage de l'oscillateur externe
- Polarisation des étages HF de la radio
- Démarrage du synthétiseur de fréquence (PLL)
- Passage en mode émission ou réception

Chaque étape prend un temps non négligeable et donc une consommation non négligeable à chaque réveil. L'énergie de surcoût dépendra donc des énergies consommées par chaque bloc électronique allumé lors de l'activation de la partie radio. Par exemple, avec l'utilisation du chip radio CC1110 de Texas instruments, la période de temps nécessaire entre l'occurrence de deux évènements devra être supérieure à 1 ms pour que l'utilisation d'un mécanisme de mise en veille soit efficace d'un point de vue énergétique.

3.4 Le modèle de portée de transmission

3.4.1 La couche réseau

La participation de la couche réseau sur l'efficacité énergétique est à prendre en considération. En effet, on sait que la méthode la plus efficace pour diminuer significativement la consommation énergétique est de réduire la puissance d'émission et donc celle de l'amplificateur de puissance. L'utilisation d'un système de communication multi-sauts prend alors tout son sens. En relayant les transmissions de paquets entre les divers noeuds pour atteindre le collecteur, on peut diminuer nettement la puissance d'émission [48].

Néanmoins, ce mode de communication est plus gourmand en termes d'intelligence et de puissance de calcul puisqu'il entraîne l'implémentation de mécanismes de routage. De plus, si dans ce cas on minimise la consommation liée à la transmission, on augmente en revanche celle liée à la réception.

Dans ce type de configuration, un récepteur est réveillé plus souvent pour être à l'écoute du canal et recevoir les paquets d'informations à relayer. Qui plus est, malgré le gain énergétique éventuellement apporté, l'augmentation de la complexité du système en termes de consommation reste difficilement quantifiable.

3.4.2 Modèle de propagation

Les modèles de propagation les plus utilisés sont : Espace libre de Friss et Two-Ray Ground.

On utilise les deux modèles suivant la distance qui sépare deux noeuds. ($distance_{seuil}$ ou $distance_{cross-over}$) :

$$distance_{cross-over} = \frac{4\pi\sqrt{L}h_r h_t}{\lambda} \quad (3.11)$$

Avec,

- $L \geq 1$ représente le facteur de perte du système,
- h_r et h_t sont les hauteurs des antennes réceptrices et émettrices,
- λ est la longueur d'onde du signal.

Espace libre de Friss

Le cas idéal où il n'y a pas d'obstacles à traverser correspond à la propagation en espace libre. La puissance P_{recue} au niveau du récepteur s'exprime selon l'équation de FRIIS [49] : Lorsque $d < distance_{cross-over}$ on a :

$$P_{recue} = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (3.12)$$

Avec :

- P_T représente la puissance de transmission,
- G_T représente gain de l'antenne émetteur.
- G_R représente gain de l'antenne récepteur,
- d la distance entre l'émetteur et le récepteur
- λ la longueur d'onde

Il paraît alors évident que le niveau de puissance reçue pour une transmission donnée dépend non seulement de la distance séparant l'émetteur et le récepteur mais également de la fréquence de transmission.

Two-Ray Ground

Lorsque $d > distance_{cross-over}$ on a :

$$P_{recue} = \frac{P_T G_T G_R h_r^2 h_t^2}{d^4} \quad (3.13)$$

L'étude de la portée de transmission a été faite dans le chapitre suivant avec une analyse des données suivant différentes portées de transmission allant de 100m à 300m.

Propagation multi-trajets

Dans la plupart des cas, un récepteur n'est pas en visibilité directe de l'émetteur. Toutes les ondes qu'il reçoit proviennent donc de différents trajets issus des interactions du signal émis avec l'environnement. Le signal reçu est égal à la somme vectorielle des échos du signal émis arrivant au récepteur, chacun étant caractérisé notamment par une atténuation, un déphasage et un retard. Dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont en visibilité directe, on parle de situation LOS (Line Of Sight) et, dans le cas contraire, de situation NLOS (Non Line Of Sight). Les différents mécanismes qui permettent à l'onde de se propager sont illustrés sur la figure ?? :

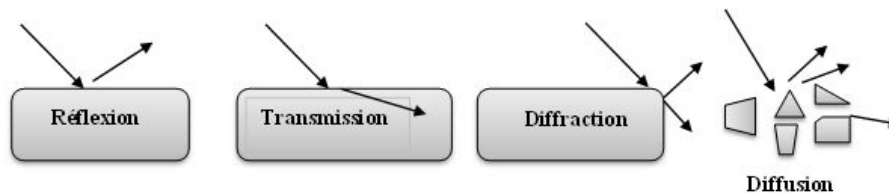


FIGURE 3.4 – Différents mécanismes de propagation de l'onde.

- **Réflexion** : ce phénomène se produit lorsque l'onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à la longueur d'onde. On distingue deux types de réflexion : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. Si la surface réfléchissante est lisse, c'est-à-dire que la taille des irrégularités à la surface de l'obstacle est petite devant la longueur d'onde, on parlera de réflexion spéculaire. À l'inverse, si la surface réfléchissante est irrégulière ou rugueuse, on parlera de réflexion diffuse.
- **Transmission** : ce phénomène permet aux ondes de traverser un obstacle. Sa contribution peut être prépondérante dans le cas de propagation indoor. Pour chaque élément traversé, l'onde subit une atténuation et un déphasage directement liés aux caractéristiques électriques (permittivité relative « ϵ » et conductivité « σ ») du matériau considéré, mais également à d'autres paramètres tels que l'épaisseur de la paroi traversée et l'angle d'incidence de l'onde.
- **Diffraction** : ce phénomène apparaît lorsque l'onde rencontre l'arête d'un obstacle dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde. C'est un des facteurs de propagation les plus importants et qui permet aux ondes radioélectriques de se propager même en cas de non visibilité entre la source d'émission et la réception.
- **Diffusion** : ce phénomène apparaît lorsqu'une onde radioélectrique rencontre une surface rugueuse. L'onde est alors réfléchie plusieurs fois et diffusée dans plusieurs directions.

3.5 Les résultats obtenus pour les modèles énergétiques

3.5.1 Les métriques utilisées

Dans l'objectif d'améliorer les performances des techniques de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, les métriques [50] suivantes ont été étudiées :

La consommation énergétique :

Il s'agit d'une moyenne totale consommée pour la transmission des paquets d'information du noeud source au noeud de destination.

Rapport du paquet reçu (Packet Delivery Fraction) \hat{n} PDF \hat{z} : Ce rapport représente le ratio du nombre de paquet d'information reçu avec succès par le noeud de destination sur le nombre total des paquets envoyés par tous les noeuds du réseau. Ce paramètre implique l'exactitude et l'exhaustivité de la technique de routage. Nous pouvons définir ce rapport par la formule mathématique suivante :

$$PDF = \frac{\sum_{i=1}^n Nb - \text{paquet} - \text{recue}}{\sum_{i=1}^n Nb - \text{paquet} - \text{envoye}} \quad (3.14)$$

Le délai (End-to-end Delay) \hat{n} EED \hat{z} : Représente le temps mis par les paquets d'information du noeud source au noeud de destination. Ce délai comprend également le temps de la découverte des chemins de routage de l'information, et les files d'attentes lors des retransmissions des paquets. Ce paramètre est calculé en soustrayant le temps à chaque envoi de paquet du noeud source au temps lors de la réception du même paquet par le noeud de destination. Enfin nous divisons par le nombre de paquets reçus par le noeud de destination. Nous obtenons la formule suivante :

$$EED = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{TempsReception} - \text{TempsEnvoie})}{\sum_{i=1}^n Nb - \text{paquet} - \text{recue}} \quad (3.15)$$

Plus la valeur de cette métrique est faible et plus la performance du protocole de routage est meilleur.

Le débit :

Ce paramètre représente le ratio du nombre total des paquets reçus sur le temps total de la durée de la simulation. Cette métrique est une preuve que le réseau parvient à envoyer les informations constamment au point de collecte. L'expression mathématique est la suivante :

$$\text{Throughput} = \frac{\sum Nb - \text{de} - \text{bit} - \text{recue}}{\text{Temps} - \text{Simulation}} \quad (3.16)$$

Les paquets perdus :

Représente le nombre total de paquets perdus durant la simulation. Les paquets perdus sont dus aux collisions durant les transmissions. La formule mathématique représentative de cette métrique est la suivante :

$$Pkt_{perdu} = Nb - \text{paquet} - \text{envoy} - Nb - \text{paquet} - \text{reue} \quad (3.17)$$

Toutes les métriques vues précédemment vont permettre de mieux analyser les performances d'un protocole de routage et ainsi définir un algorithme de routage pour les réseaux de capteurs sans fil idéales dont le but d'optimiser la consommation énergétique des capteurs.

3.6 Simulations et résultats

les différents paramètres utilisés durant nos simulations sont reportés dans le tableau suivant :

TABLE 3.1 – Paramètres de simulations

Paramètres	valeurs
Nombre de noeuds déployés	50, 70 et 90
Taille du réseau	1000m x 1000m
Stratégie de déploiement	Aléatoire
Portée de transmission	100m, 200m, 300m et variable
Energie initiale d'un noeud	30Joules
Puissance Rx	0,1 mw
Puissance Veille	0,06mw
Temps de simulation	150 s
Le modèle d'antenne	Omni antenna
Modèle de propagation	Two Ray Ground et Path Loss
Protocole de transport	TCP

Avec les puissances de transmissions suivantes :

TABLE 3.2 – Les différentes portées de transmissions utilisées

Distance (mètres)	Puissance de transmission
100	0,0072
200	0,115
300	0,584
Variable	$in[0,0072; 0,584]$

Les résultats obtenus par les différentes simulations dépendront des métriques étudiées. Pour les simulations nous avons essayés de reproduire un scénario réaliste ou tous les noeuds peuvent à tout moment envoyer des informations à un noeud de destination. Et donc tous noeud lors de la simulation est un noeud source.

Dans les scénarios de la simulation le nombre de noeuds et la portée de transmission varient. Dans le cas de la portée de la transmission variable la portée sera aléatoire pour chaque noeud et sera comprise entre 100 mètres et 300 mètres.

3.6.1 Consommation énergétique

La consommation énergétique totale en fonction de la portée de transmission nous donne les résultats suivants pour les protocoles de routages DSR, AODV et DSDV [51].

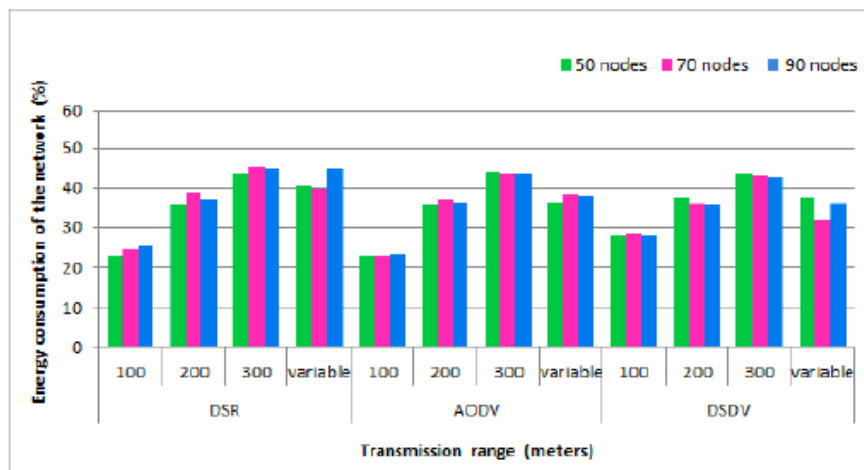


FIGURE 3.5 – La consommation énergétique des trois protocoles pour différentes portées de transmission.

Nous remarquons que pour les différentes simulations nous avons une augmentation de consommation énergétique pour une portée de transmission de plus en plus grande. Ainsi qu’une augmentation de la consommation de l’énergie pour chaque noeud en fonction du nombre de noeud utilisé lors des simulations.

D’autre part, les résultats de la simulation montre que le protocole de routage AODV permet une meilleure conservation de l’énergie comparée aux protocoles DSR et DSDV.

3.6.2 Rapport de paquet reçus

Cette métrique permettra d’illustrer le rapport de paquet d’informations qui sont reçus avec succès par le point de collecte. La valeur du ratio impliquera une meilleure performance de la technique de routage.

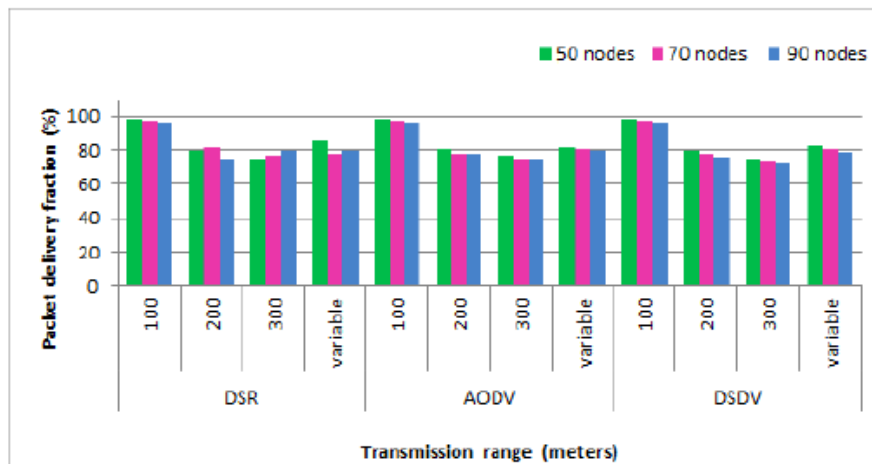


FIGURE 3.6 – Le rapport des paquets reçus pour les trois protocoles pour différentes portées de transmission.

3.6.3 Délai de transmission et nombre de paquets perdu

Le délai mis par le paquet pour parcourir le réseau est arrivé à destination nous donne une estimation sur la fiabilité du réseau ainsi que l'efficacité du routage mis en place pour permettre le bon fonctionnement du réseau. Nous observons sur la figure 3.8 le nombre total de paquets perdus pour les différents protocoles de



FIGURE 3.7 – Le délai des paquets pour parvenir au point de collecte

routages considérés en utilisant différentes portées de transmission.

3.6.4 Débit

La figure 3.9 représente le débit moyen pour chaque protocole de routage et pour différentes portée de transmission.

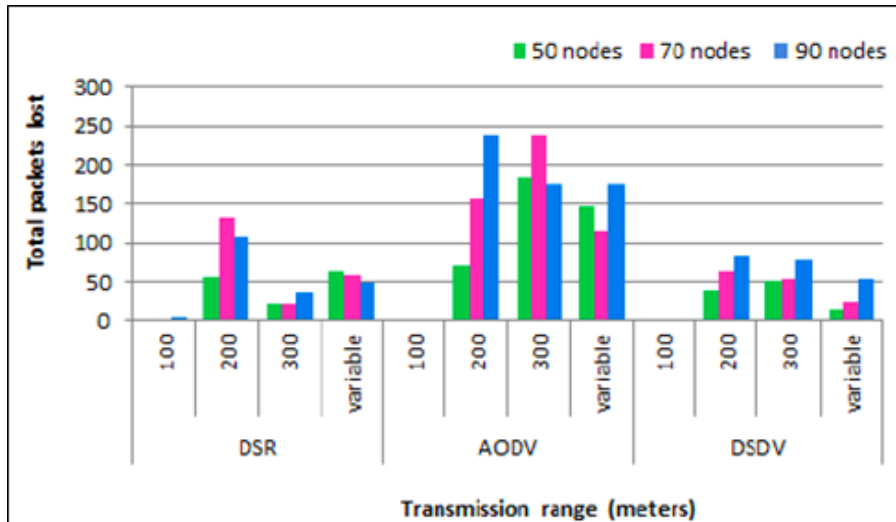


FIGURE 3.8 – Nombre total de paquets perdus

3.7 Conclusion

La gamme de transmission et un nombre différent de noeuds de capteurs en tant que paramètre de système affecte la consommation d'énergie globale et le rendement du réseau de capteurs sans fil.

En effet, la portée de communication du noeud de détection est une mesure très importante qui peut avoir une influence sur la connectivité du réseau. Ce chapitre a étudié l'impact de la plage de transmission variable sur les indicateurs de performance des trois plus populaires et distincte protocoles fonctionnalité de routage AODV, DSR et DSDV.

En comparant ces mécanismes de routage sur la base de différents indicateurs de performance nous concluons que la portée de transmission variable offre une bonne performance pour tous les paramètres et il est plus approprié surtout pour la portée de communication haute.

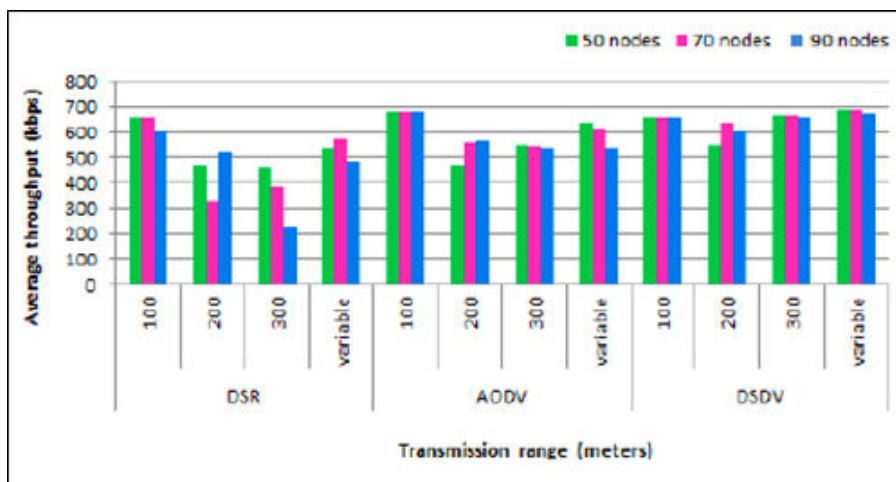


FIGURE 3.9 – Le débit des trois protocoles pour différentes portées de transmission

Les nouveaux protocoles de routage et leurs critères

Sommaire

4.1 Introduction	58
4.2 Problématique récurrente de la durée de vie d'un réseau de capteur	58
4.2.1 Problématique	59
4.2.2 La consommation énergétique	59
4.3 Les techniques multi-chemins dans les réseaux de capteurs sans fil	64
4.3.1 Objectifs et composants d'une solution de routage multi-chemin	65
4.3.2 Types de chemins multiples	65
4.4 Conception et application du protocole CEDM-DR	66
4.4.1 Principe l'algorithme CEDM-DR	67
4.4.2 Modèle energetique adopté dans CEDM-DR	68
4.4.3 L'algorithme CEDM-DR	69
4.5 Simulations et résultats	69
4.6 Conclusion	71

4.1 Introduction

L'analyse de la performance des deux protocoles de routage réactif et proactif à savoir DSR, AODV, DSDV a été étudié dans nos travaux antérieurs [51] sur la base de diverses mesures de rendement et selon divers scénarios de trafic. Grâce à des divers simulations, nous avons déduit que le protocole AODV et DSR donne de meilleures performances que le protocole DSDV même lorsque le réseau dispose d'un grand nombre de noeuds de capteurs.

Les résultats révèlent également que la technique de routage AODV devient plus efficace en fournissant de meilleures performances lorsque les paramètres étudiés sont simulés. Ainsi, nous avons conclu que le protocole AODV peut être considéré comme le protocole la plus efficace pour la consommation énergétique. Mais le problème majeur de ce genre de réseau est une consommation de l'énergie inégale dans le réseau. En effet, les noeuds proches du point de collecte sont trop souvent sollicités pour des retransmissions de l'information ce qui nuit considérablement à la durée de vie du réseau. Durant ce chapitre nous exposons un nouveau protocoles de routages permettant de remédier au problème de consommation de l'énergie inégale dans le réseau.

4.2 Problématique récurrente de la durée de vie d'un réseau de capteur

Dans les différents protocoles de routages nous retrouvons pratiquement toujours le même problème qui revient tout le temps. Il s'agit de la durée de vie du réseau qui reste limité. En effet, en essayant de changer le protocole de routage, nous pouvons obtenir des économies d'énergie mais le réseau peut ne plus fonctionner car des noeuds dont la position dans le réseau est considérée comme stratégique ont épuisé leur énergie.

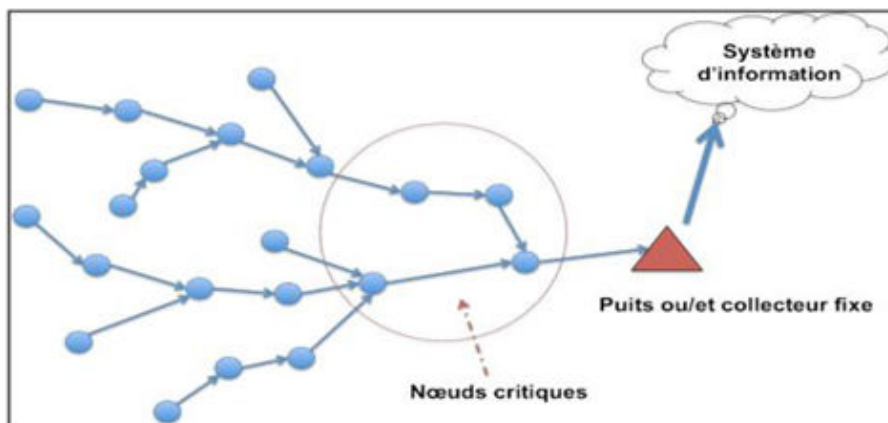


FIGURE 4.1 – Noeuds critiques dans un réseau

4.2.1 Problématique

La transmission des données sont envoyés vers un noeud qui sera le point de collecte des informations sur l'environnement où sont déployés les différents noeuds. Le routage intervient dès lors, pour permettre à tous les noeuds du réseau de faire parvenir leurs informations jugées vitales au point de collecte. Le routage à la lourde tâche, de parvenir au bon déroulement des communications dans un réseau de capteur mais également dans le cas des réseaux de capteurs sans fil, à un compromis avec une gestion excellente des transmissions pour ne pas tomber dans une surconsommation énergétique.

Le changement de la topologie du réseau (mobilité, environnement, etc.) ajoute aussi à la complexité au routage des transmissions des informations pour un réseau de capteurs sans fil.

Somme toute, la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil dépendra essentiellement de l'algorithme de routage qui permettra une optimisation de la consommation énergétique. Nous allons voir par la suite, que l'optimisation de l'énergie ne doit pas être nécessairement uniforme sur tout le réseau, car la topologie [52] et le nombre de point de collectes disséminées dans le réseau ont un rôle des plus importants dans la durée de vie d'un réseau.

4.2.2 La consommation énergétique

Nous avons simulé avec le NS2 « Network Simulator 2 » un réseau de capteurs sans fil composé de 100 noeuds éparpillés de façon aléatoire dans une surface de 1000mx1000m. La figure 4.2 montre une surconsommation d'énergie des noeuds capteurs qui sont proches du point de collecte, puisque ces derniers sont beaucoup sollicités afin de transmettre les paquets au noeud puits. La simulation génère un fichier trace qui permet d'avoir les paramètres de tous les noeuds du réseau pendant tout le temps de la simulation. Un exemple d'un fichier trace est illustré dans la figure 4.3.

Le fichier trace regroupe toutes les informations et les communications qui s'effectuent lors de la simulation du réseau de capteur. À partir du fichier trace, nous pouvons extraire plusieurs informations au sujet des différents noeuds du réseau. Nous détaillons ci-dessous les informations que nous pouvons extraire du fichier trace à l'aide d'un exemple.

Dans cet exemple, nous pouvons récupérer les données suivantes (figure 4.5 : Il s'agit d'un message reçu au temps de simulation 68,48 secondes au noeud 60. Bien sûr d'autres informations sont également importantes, mais ce qui nous intéresse plus particulièrement ici ce sont les informations sur le routage mais également les données sur la consommation énergétique lors de la simulation.

La figure 4.6 reporte le positionnement des noeuds du réseau. La numérotation des noeuds va de 0 à 99. Le noeud 99 étant le point de collecte des données. Toute information et données circulant dans le réseau a pour destination le noeud 99. Le point de collecte possède dans notre scénario une énergie initiale illimitée qui

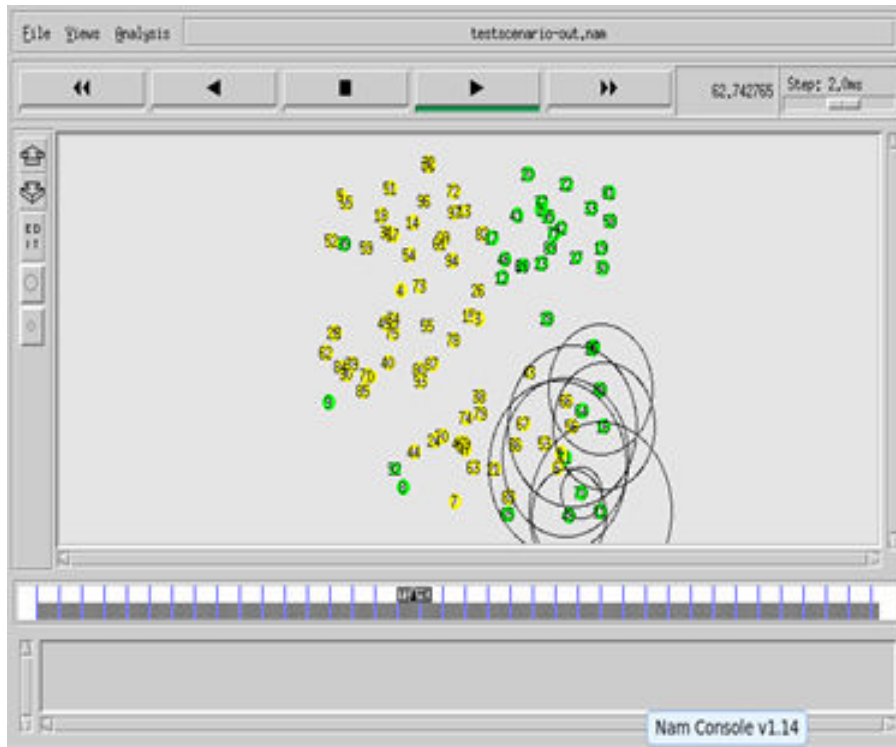


FIGURE 4.2 – Exemple de simulation d'un RCSF de 100 noeuds, NS2

permet à celui-ci d'être actif tout au long de la simulation.

Différentes couleurs désignent les niveaux d'énergie pour chacun des noeuds du réseau. La couleur verte représente des noeuds possédant encore une quantité importante d'énergie. Les noeuds de couleur jaunes ont une consommation énergétique relativement moyenne alors que les noeuds rouges ont eu une consommation importante de leur énergie initiale.

Nous remarquons pour cette simulation que la consommation énergétique des capteurs devient de plus en plus importante lorsque l'on s'approche du point de collecte. Nous analyserons des noeuds du réseau ayant un positionnement différents les uns des autres pour confirmer notre démarche.

Le noeud 35 se situe au plus proche du point de collecte. Le graphique ci-dessus décrit la situation de ce noeud pendant la simulation en représentant l'énergie du capteur, les octets reçus ainsi que les octets envoyés.

Nous pouvons remarquer que le nombre d'octets envoyés sont nettement supérieures aux octets reçus mais qu'ils sont également proportionnelles. Ce qui nous indique que le noeud 35 procède a de nombreuses retransmissions de données vers le point de collecte.

Le positionnement du noeud 15 est au centre du réseau, et celui-ci se trouve éloigné du point de collecte par rapport au noeud 35 vu précédemment. Le nombre d'octets retransmis par le noeud 15 est important mais pas autant que le noeud 35. La durée de vie du noeud est plus grande que pour le noeud 35, elle dure approxi-

```

testscenario4.tcl  testscenario-out.tr
0.000 et 0.894 er 3.090] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688154 44 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.425861 ei 1.737 es
0.000 et 0.665 er 3.172] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688181 49 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.323134 ei 1.399 es
0.000 et 0.327 er 3.951] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688232 60 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.355882 ei 1.399 es
0.000 et 0.280 er 3.965] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688255 47 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.183209 ei 1.520 es
0.000 et 0.702 er 3.595] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688309 74 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 3.840992 ei 1.352 es
0.000 et 0.951 er 3.857] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688414 63 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.418079 ei 1.566 es
0.000 et 0.430 er 3.586] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688427 92 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.829409 ei 1.874 es
0.000 et 0.283 er 3.013] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688459 8 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.919371 ei 1.934 es
0.000 et 0.239 er 2.908] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688462 93 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 3.980996 ei 0.930 es
0.000 et 0.144 er 4.944] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688478 79 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 3.782170 ei 1.204 es
0.000 et 0.824 er 4.190] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688496 7 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 4.485116 ei 1.651 es
0.000 et 0.456 er 3.408] ----- [50:255 80:255 32 0] 2 [1 50] [0 50 0 0->16] [1 1 0 24->93]
r 68.480688554 38 RTR --- 135520 DSR 80 [0 ffffffff 18 800] [energy 3.966330 ei 1.263 es

```

FIGURE 4.3 – Exemple d'un fichier trace, NS2

mativement 118 secondes.

Prenons un autre exemple, comme le capteur numéro 66 qui est un des noeuds les plus éloignés du point de collecte. Le nombre d'octets reçus est ici plus important que le nombre d'octets envoyés. Il y a pour ce noeud moins de retransmission que les noeuds que nous avons pu analyser précédemment.

À cet égard, nous proposons un nouveau protocole de communication, efficace dans la consommation de l'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil basé sur la plate-forme AODV [53]. Le principal objectif de notre démarche est d'améliorer la durée de vie du réseau ainsi que de découvrir le chemin optimal par le capteur de la source à la destination en fonction de la combinaison de deux indicateurs les plus importants pour évaluer le chemin optimal à savoir : la distance par rapport au point de collecte et de l'énergie disponible dans chaque noeud de capteur fonctionnant comme routeur. Notre nouvel algorithme étend et optimise l'approche routage AODV.

Dans la communication sans fil, nous pouvons distinguer deux catégories. La première doit avoir un accès direct à la station de base (BS) pour la transmission des communications. Bien que le deuxième ait la possibilité d'accéder à la station de base par l'intermédiaire des noeuds intermédiaires qui utilisent une communication saut par saut (hop by hop). Le problème le plus important pour un réseau ad-hoc est la réception de paquets de données entre les noeuds mobiles. Alors que la topologie du noeud change fréquemment ce qui rend le routage plus complexe. La faible bande passante, la capacité limitée de la batterie, et la prédisposition à des erreurs ajoutent à la complexité de la conception d'un protocole de routage efficace. Une technique de routage dans RCSF présente de nombreux défis par rapport au routage de données dans les réseaux filaires.

En effet, le choix de la voie d'acheminement se fait par des algorithmes. Les différentes méthodes de routage sont proposées pour les réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles sont classés en fonction de nombreux paramètres et aux stratégies de découvrir et de maintenir des routes. Les protocoles peuvent être classés en

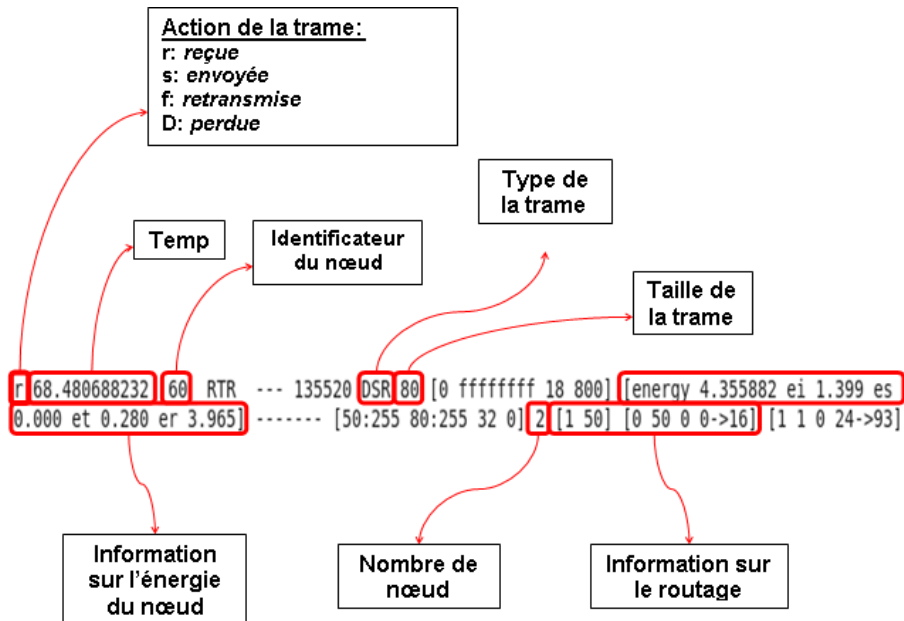


FIGURE 4.4 – Récupération des données du fichier trace

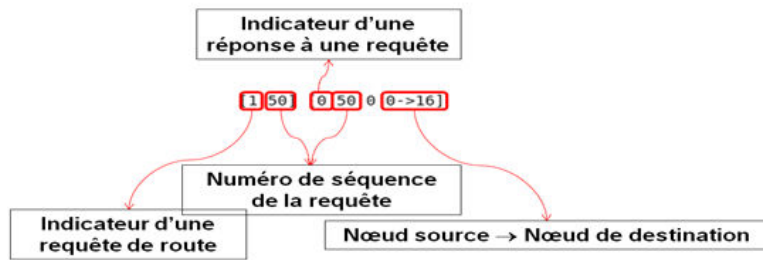


FIGURE 4.5 – Information sur une requête de routage

tant que réactif, proactif et hybride, en fonction de leur fonctionnement et le type de demande. Les protocoles proactifs contrôlent la connectivité entre les noeuds pour assurer la disponibilité de tout chemin entre les noeuds actifs. Dans l'objectif de maintenir une topologie de réseau commun, les noeuds de capteurs annoncent leurs tables de routage de l'état à l'ensemble du réseau. D'autre part, les protocoles réactifs établissent des chemins seulement sur demande. Les noeuds transmettent chaque demande de routage à leurs pairs jusqu'à ce que vient à un noeud puits et la dernière réponse sur la voie de communication inverse.

Nous abordons une problématique connue dans les réseaux de capteurs sans fil. Il s'agit de la consommation énergétique excessive que rencontrent des capteurs se trouvant à la portée de communication du point de collecte. En effet, si tous les entités du réseau ont pour objectif d'envoyer des informations vers le point de collecte, les noeuds intermédiaires ont pour rôle de relayer l'information vers le noeud destinataire. Cette retransmission de l'information peut se révéler désastreuse pour des noeuds proches du noeud destinataire, car cette retrans-

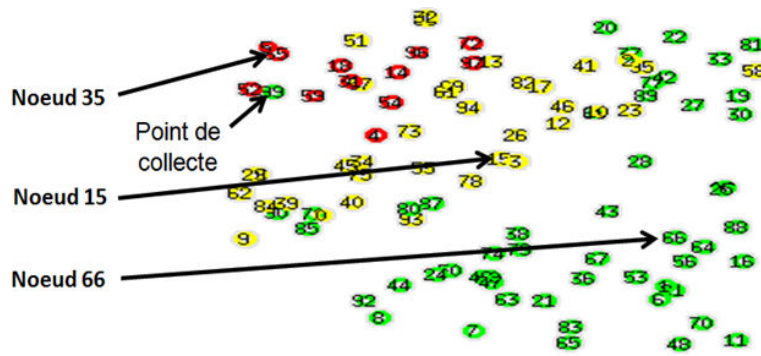


FIGURE 4.6 – Positionnement des nœuds lors de la simulation

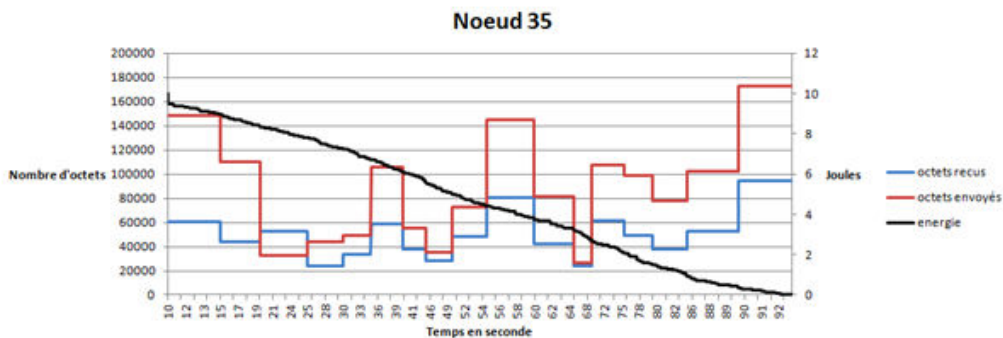


FIGURE 4.7 – Les informations concernant le noeud capteur numéro 35

mission des données à un coût énergétique. Les nœuds voisins au point de collecte verront la batterie se vider très rapidement par rapport à l'ensemble des capteurs présents dans le réseau. Et si les nœuds intermédiaires proches du point de collecte ne seront plus fonctionnels car ils n'ont plus assez d'énergie, la retransmission des données devient alors impossible ce qui engendre l'arrêt des transmissions dans tout le réseau.

Une étude que nous avons menée nous a permis de confronter les résultats obtenus avec cette problématique. Nous partons d'une simulation d'une centaine de nœuds qui ont chacun la possibilité d'envoyer des informations au point de collecte mais qui joue également le rôle de relais si cela est nécessaire. Nous portons l'étude sur 3 nœuds du réseau (cf. figure 4.7, 4.8 et 4.9) qui ont été choisis pour leur proximité par rapport au point de collecte.

Après obtention des résultats de la consommation énergétique des nœuds mais également du nombre de données reçus et envoyés confirme que cette problématique est inhérente à l'ensemble des réseaux de capteurs sans fil. La durée de vie du réseau va dépendre de la durée de vie des capteurs ayant une position stratégique dans le réseau, du fait de leur positionnement par rapport au point de collecte.

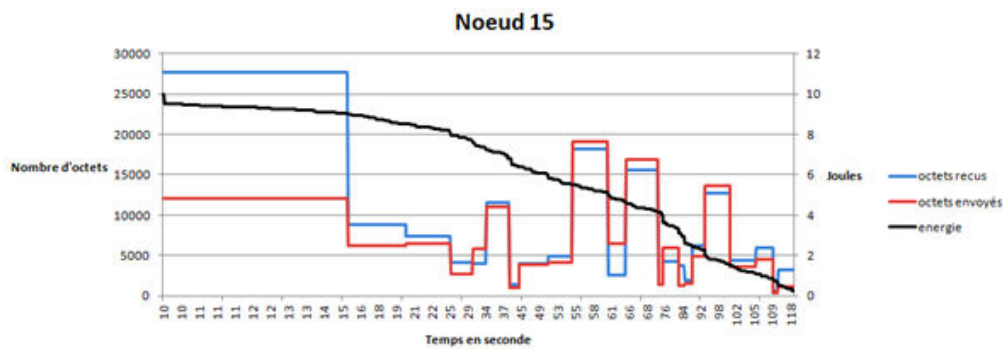


FIGURE 4.8 – Les informations concernant le noeud capteur numéro 15

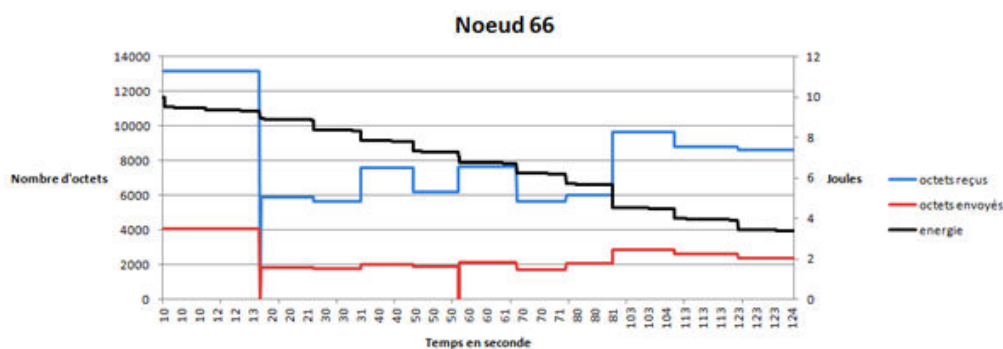


FIGURE 4.9 – Les informations concernant le noeud capteur numéro 66

4.3 Les techniques multi-chemins dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans les réseaux ad-hoc sans fil multi-sauts, les noeuds sont potentiellement mobiles et interconnectés par une technologie sans fil, formant ainsi un réseau dynamique temporaire sans l'aide d'une infrastructure. Les réseaux de capteurs, les réseaux maillés sans fil et les réseaux ad-hoc constituent des exemples de réseaux multi-sauts. L'avantage de la communication sans fil multi-saut consiste en la possibilité d'étendre la connectivité dans la mesure où des liens entre des noeuds qui ne sont pas en connexion directe peuvent communiquer à l'aide de noeud intermédiaire. En dépit de la grande flexibilité offerte par ces communications sans fil non directes, nous sommes également confrontés à un grand nombre de défis dans l'accès au médium, la conservation d'énergie, le routage des paquets, etc.

Parmi ces défis, la difficulté réside de déterminer et maintenir un trajet adaptée pour pouvoir acheminer les paquets efficacement entre une source et une destination, en raison d'un manque de fiabilité du support sans fil, des modestes capacités de traitement et de mémoire des entités impliquées et des changements éventuellement rapides de la topologie. Plusieurs protocoles de routage à chemin unique ont été proposés pour les réseaux ad-hoc sans fil. Les différents protocoles ont souvent du mal à assurer des transmissions fiables des données à

cause des fréquentes ruptures de liens et ne fournissent pas non plus une distribution équilibrée de la charge dans le réseau.

Alors que certains noeuds sont peu impliqués dans le routage, d'autres sont sensiblement congestionnés et acheminent la plupart du trafic du réseau. Cette répartition de charge non-homogène conduit à une consommation rapide des ressources par les noeuds saturés et peut provoquer une forte congestion dans certaines parties du réseau.

De nouvelles techniques de routage, utilisant le multi-chemin semble être une solution efficace dans les réseaux sans fil multi-sauts à forte mobilité et à forte charge. En effet, en distribuant le trafic entre une source et une destination sur plusieurs chemins, cela permet de mieux répartir la charge dans le réseau ainsi de se prémunir contre le problème de rupture de route.

4.3.1 Objectifs et composants d'une solution de routage multi-chemin

Un routage à chemins multiples consiste à considérer non plus une seule route entre une source et une destination pour la transmission de données, mais un ensemble de chemins. Une technique de routage qui se base sur des chemins multiples peut répondre à deux objectifs principaux :

- Tolérance aux pannes : la tolérance aux pannes peut souvent être réalisée via deux approches comme l'envoi de paquets redondants sur des chemins multiples ou l'établissement à l'avance d'un ou plusieurs chemins de secours en cas de panne.
- Partage de charge : le partage de charge consiste à une utilisation efficace des ressources disponibles dans le réseau. Plusieurs travaux ont prouvé que la répartition des données d'un flux sur des chemins multiples permet de réduire la congestion et les goulots d'étranglement.

Le routage multi-chemin est basé sur trois mécanismes :

- La découverte des chemins correspond au processus de recherche de chemins multiples entre deux noeuds.
- La maintenance des chemins consiste à réparer les routes en panne en cherchant de nouvelles routes valides.
- L'allocation du trafic décide comment les données à transmettre vont être distribuées sur les chemins disponibles entre une source et une destination dans le réseau.

4.3.2 Types de chemins multiples

Dans un réseau ad-hoc sans fil, la communication directe (sur un seul saut) entre deux noeuds est assurée sur un lien. En revanche, la communication multi-saut entre deux noeuds distants est assurée sur un chemin.

L'ensemble des chemins construits entre deux capteurs, suite à la phase de découverte des chemins, a un

impact important sur la performance du routage. En effet, suivant comment les chemins sont organisés les uns par rapport aux autres, les performances du routage peuvent varier.

Il est donc intéressant de considérer des chemins disjoints. En général, on cherche des chemins disjoints sur le graphe induit par le réseau (où deux noeuds sont reliés par un lien si les deux noeuds peuvent communiquer directement). Deux types de chemins disjoints sont considérés :

- Chemins à noeuds disjoints : il n'y a que la source et la destination comme noeuds en commun entre les différents chemins.
- Chemins à liens disjoints : il n'y a aucun lien en commun entre les différents chemins.

Les notions de chemins disjoints présentées précédemment ne garantissent néanmoins pas que les chemins pourront être utilisés simultanément. En effet, dans le cadre de chemins à liens disjoints où certains noeuds sont partagés par différents chemins, ces noeuds ne pourront transmettre que sur un chemin à la fois, en particulier dans un contexte mono-interface, mono-canal. De plus, les chemins à noeuds disjoints n'impliquent pas forcément une utilisation simultanée des routes. En effet, cela dépend du protocole MAC sous-jacent, des différents paramètres physiques et de la topologie du réseau.

Par conséquent, lors de la sélection des chemins multiples, il peut être utile de choisir les chemins les plus indépendants possibles afin d'avoir un maximum de noeuds qui peuvent émettre en parallèle et d'avoir le minimum d'interférence entre les chemins.

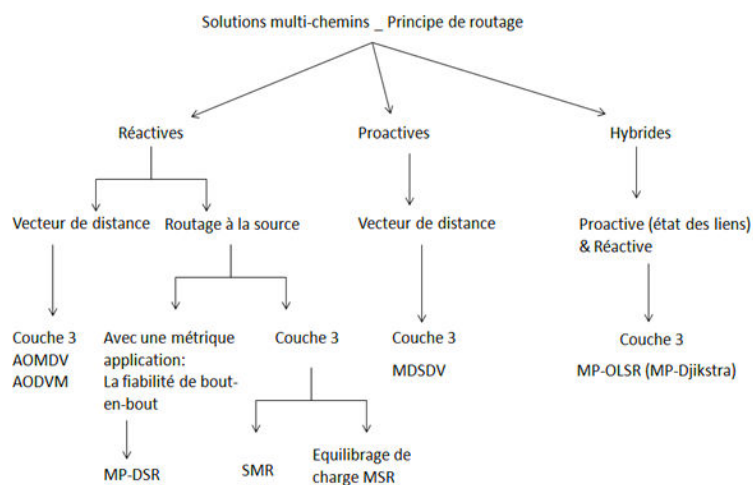


FIGURE 4.10 – Protocoles de routage multi-chemin

4.4 Conception et application du protocole CEDM-DR

Nous essayons d'apporter des éléments de réponse à la problématique décrite en début de chapitre. Une des solutions que nous avons adoptées est un nouvel algorithme que l'on a nommé CEDM-DR (Combined Energy

and Distance Metrics Dynamic Routing Protocol) [54] qui est une extension du protocole AODV. En effet, Les principaux protocoles de routage y compris AODV, utilisent une métrique qui sert de référence pour le fonctionnement du réseau. C'est-à-dire qu'un protocole de routage a la possibilité d'améliorer soit la consommation énergétique du réseau, ou le débit, ou le délai de transmission, etc.

En revanche, notre nouveau protocole de routage CEDM-DR, utilise une combinaison de métriques qui sont l'énergie résiduelle dans les noeuds ainsi que les distances entre les noeuds intermédiaires et la distance par rapport au point de collecte. Cette combinaison de métrique est utilisé dans l'objectif d'avoir une consommation de l'énergie homogène dans un réseau de capteurs sans fil et ainsi augmenter la durée de vie du réseau.

4.4.1 Principe l'algorithme CEDM-DR

Le nouvel algorithme se compose de trois phases :

Phase d'initialisation

Cette phase commence après que les noeuds de capteurs soient répartis de façon aléatoire dans la zone d'application. Au début, chaque noeud diffuse un message « HELLO » à ses voisins. Le message HELLO contient : l'adresse du noeud (fixe) et Hop Count (un compteur de saut). Le nombre de sauts est utilisé pour configurer le poids du noeud. Après la diffusion du message HELLO, tous les noeuds construisent leurs tables de routages à 1 saut et enregistre le nombre de saut dans sa mémoire. Par la suite chaque noeud qui a reçu le message HELLO continuera à diffuser ce message aux noeuds suivant.

Phase de calcul

Après la phase d'initialisation, chaque noeud du réseau évalue les distances lui permettant d'atteindre le point de collecte en se basant sur le poids des noeuds intermédiaires. Le poids de chaque noeud étant composé de l'énergie résiduelle ainsi que les distances les séparant des autres noeuds, la complexité de ce calcul est relativement faible puisqu'une seule variable est mise à jour pendant la durée de la simulation car les noeuds composant le réseau sont fixes.

Phase de routage

Après les phases de découverte du réseau et du calcul des poids, la phase de routage commence. Au démarrage de la simulation, tous les noeuds possèdent une batterie pleine et avec la même quantité d'énergie. De plus, chaque noeud connaît son énergie résiduelle tout au long de la simulation.

Après détection d'un événement le noeud souhaitant envoyer des informations choisi le noeud voisin avec le poids le plus élevé et ainsi de suite jusqu'au noeud de destination. Et à la réception les noeuds intermédiaires répondent aux noeuds voisins en insérant dans l'acquittement du message reçu son énergie résiduelle afin de remettre à jour les tables de routage.

4.4.2 Modèle énergétique adopté dans CEDM-DR

Dans ce travail, nous rappelons que l'énergie consommée par l'émetteur et les blocs de récepteur a été évaluée pour le calcul de la consommation totale d'énergie dans le réseau. L'énergie totale consommée par un capteur sans fil est l'énergie consommée par son bloc de communication (émetteur / récepteur), le bloc et le traitement de détection bloc [55]. Dans cette étude, nous supposons que l'énergie consommée par le capteur et le bloc de traitement est négligée.

$$E_{tot-c}(S) = E_{c-sens} + E_{c-proc} + E_{c-com} \quad (4.1)$$

Avec,

- E_{c-sens} représente l'énergie consommée pendant le processus de détection.
- E_{c-proc} représente l'énergie consommée durant la phase de traitement des processus.
- E_{c-com} représente l'énergie consommée pendant la phase de communication.

pour simplifier, nous pouvons deduire que :

$$E_{tot-c}(S) \approx E_{c-com}(S) \quad (4.2)$$

Durant notre étude, nous avons également considéré le modèle énergétique suivant :

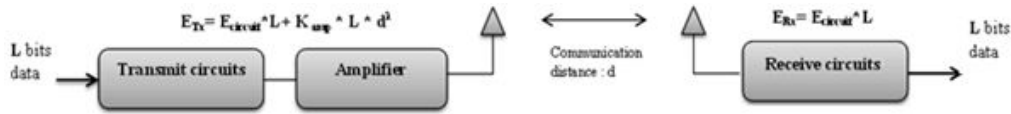


FIGURE 4.11 – Circuit de la transmission des données.

L'énergie totale consommée pendant par le processus de communication est décrit par la formule suivante :

$$E_{tot-c}(S) = E_{Tx}(l, d) + E_{Rx}(l, d) \quad (4.3)$$

Avec,

- E_{Tx} représente l'énergie consommée lors du processus de transmission.
- E_{Rx} représente l'énergie consommée lors du processus de réception.
- l représente le nombre de bits envoyés.
- d représente la distance séparant le transmetteur et le récepteur

Ainsi, l'expression de chaque terme est comme suit :

$$\begin{aligned} E_{Tx} &= E_{circuit} * l + K_{amp} * l * d^\lambda \\ E_{Rx} &= E_{circuit} * l \end{aligned} \quad (4.4)$$

Avec,

- $E_{circuit}$ représente l'énergie consommée par les circuits électroniques du capteur.
- K_{amp} représente le coefficient d'amplification pour la transmission.
- λ représente le coefficient d'atténuation.

4.4.3 L'algorithme CEDM-DR

Dans cette section, nous décrivons l'algorithme de notre nouveau protocole de routage qui est basé sur la combinaison de deux grands paramètres : la distance et de l'énergie.

Algorithm : **CEDM-DR**

Étape 1 : Chaque noeud (s) du réseau transmet des messages « HELLO » pour permettre de découvrir les noeuds voisins à un saut.

Étape 2 : Vérification que le point de collecte et le noeud source ne sont pas des noeuds voisins (Si cela est vrai passez à l'étape 3 sinon Stop).

Étape 3 : Tous les noeuds du réseau découvrent leurs noeuds voisins grâce à l'**étape 1**.

Étape 4 : Tous les noeuds du réseau évaluent la distance entre chaque voisin et le point de collecte. Cette distance est exprimée comme suit : $D_{sink} = \sqrt{(X_s - X_{sink})^2 + (Y_s - Y_{sink})^2}$

Avec X_s et Y_s sont respectivement les coordonnées du noeud « s » . et X_{sink} et Y_{sink} sont les coordonnées du point de collecte.

Étape 5 : Le poids est calculé en utilisant deux paramètres qui sont l'énergie restante au noeud de réception et la distance entre le noeud récepteur et le puits.

Étape 6 : Lorsque l'un des noeuds a besoin de transmettre des données, il va choisir le noeud avec le poids le plus élevé parmi ces voisins.

4.5 Simulations et résultats

Les paramètres de simulation pris en compte durant nos simulations sont résumés dans le tableau 4.1. Pour simuler différents protocoles de routage nous avons choisi Network Simulator 2 (NS2) ; car c'est un logiciel libre pour laquelle la source à des spécifications différentes de l'environnement et donc peut être modifié et changé.

La performance du protocole de routage AODV et le nouveau protocole CEDM-DR sont évalués sur la base de différents indicateurs de performance à savoir : la consommation d'énergie moyenne, la durée de vie

TABLE 4.1 – Paramètres de simulations

Paramètres	valeurs
Protocole de routage	AODV, CEDM-DR
Nombre de noeuds déployés	25200
Taille du réseau	400mx400m
Stratégie de déploiement	Aléatoire
Portée de transmission	100m
Energie initiale d'un noeud	2.5Joules
Puissance de transmission	0,07 mw
Puissance en mode actif	0,03mw
Puissance en mode veille	0,01mw
Energie du circuit	50 nJ/bit
Coefficient d'amplification K	100 pJ/bit/m ²
Temps de simulation	150 s
Le modèle d'antenne	Omni antenna
Modèle de propagation	Two Ray Ground et Path Loss
Protocole de transport	TCP/UDP

du réseau et le nombre de paquets de données perdus.

L'énergie moyenne consommée par les capteurs en fonction du nombre de noeuds est illustré sur la figure 4.13. Nous constatons que pour toutes les variations du nombre de noeud, avec le nouveau protocole de routage mis en oeuvre CEDM-DR, la consommation est optimale par rapport au protocole AODV traditionnel, nous observons entre 0% et 66% d'économies d'énergie par rapport à AODV.

La figure 4.14 représente le nombre de noeuds vivants sur un total de 200 noeuds par rapport au nombre de transmissions lors de la simulation. Ces courbes montrent que le nouveau protocole CEDM-DR améliore la durée de vie de l'ensemble du réseau. Ceci est principalement dû à la priorité du poids dynamique adopté pour l'utilisation de l'acheminement des données.

La figure 4.15 décrit le nombre total de paquet perdu en fonction du nombre de noeuds de capteurs. Par ces courbes, nous confirmons que notre nouvelle approche permet d'obtenir un nombre inférieur de paquet perdu

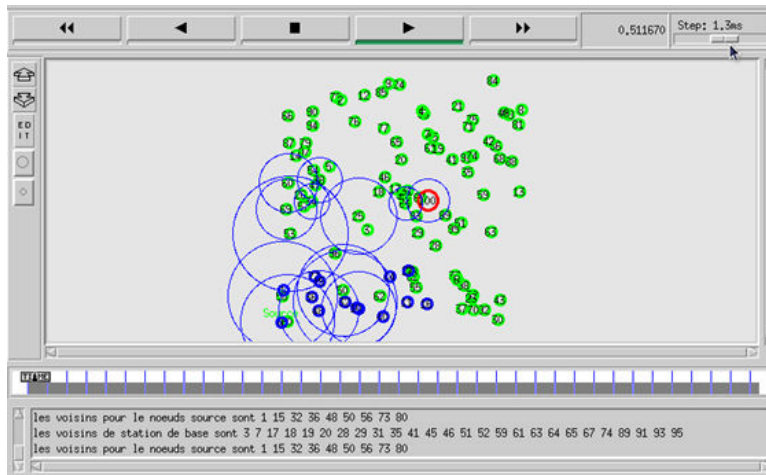


FIGURE 4.12 – Simulation du nouveau protocole de routage

que le protocole AODV. Le protocole CEDM-DR réduit entre 0% et 50% les paquets perdus.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et décrit brièvement les problématiques que nous retrouvons dans la plupart des cas dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce que nous retrouvons comme défaut récurrent dans l'objectif d'une optimisation des réseaux de capteurs sans fil est la topologie et disposition des noeuds.

En effet les protocoles de routages n'ont aucune possibilité de gérer les noeuds trop souvent sollicités et qui peuvent perturber le bon déroulement des communications dans le réseau. Nous avons essayé de donner un élément de réponse qui permettrait de soulager le réseau et ainsi décongestionnera les communications vers des noeuds que l'on nommera « noeud critique ».

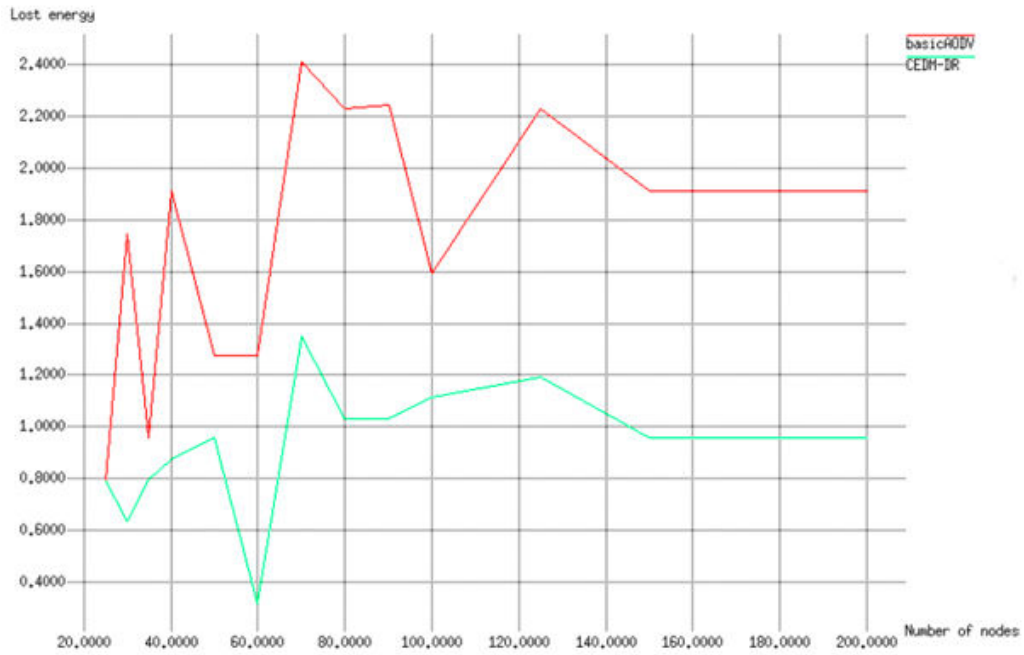


FIGURE 4.13 – Perte d'énergie pour les protocoles de routage

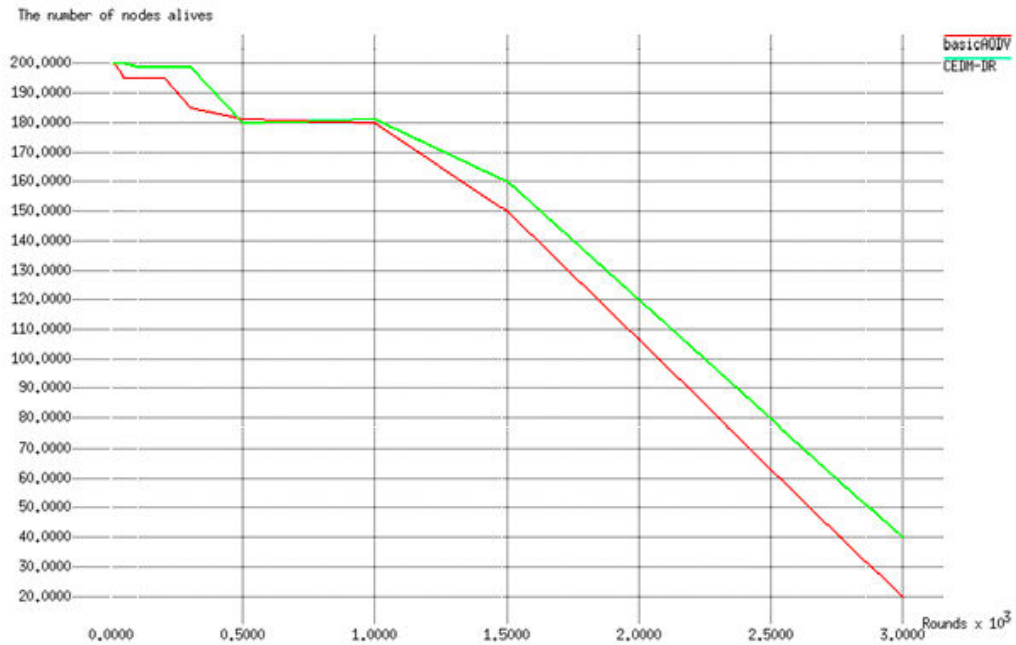


FIGURE 4.14 – Le nombre de noeuds vivant pendant la simulation

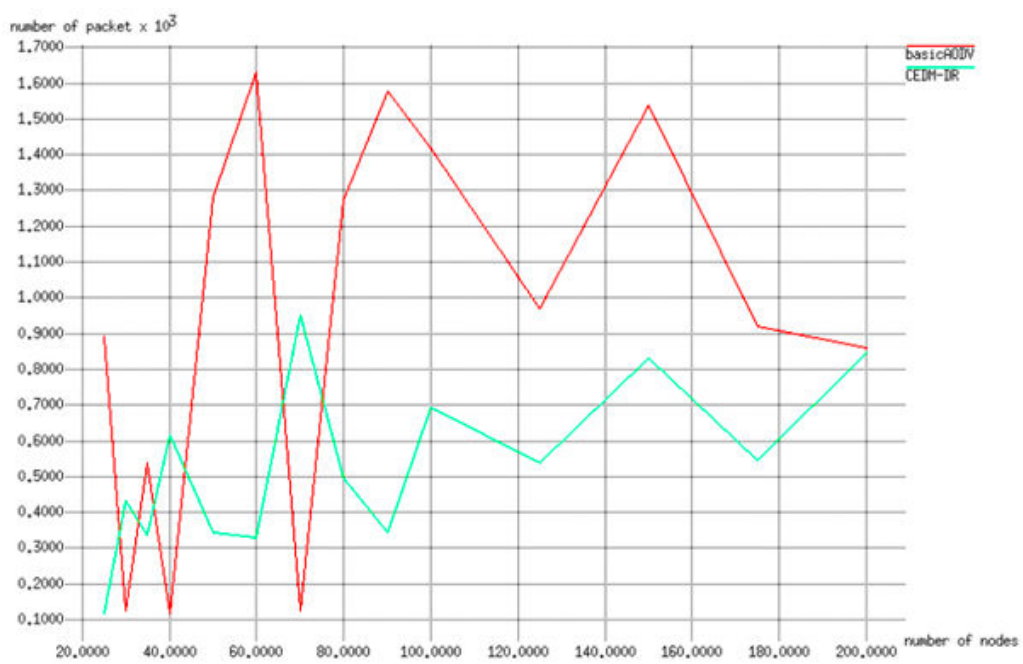


FIGURE 4.15 – Le nombre de noeuds vivant pendant la simulation

Conclusion générale

La forte croissance des réseaux de capteurs a été accompagnée de nouveaux défis liés à leurs capacités physiques et énergétiques. En effet, à cause de leurs sources limitées en énergie et de leur faible puissance d'émission, les perturbations du canal radio affectent gravement les performances de ce type de réseaux.

Dans ce rapport, nous avons tout d'abord défini et décrit brièvement ce qu'est un réseau ad-hoc et ses caractéristiques ainsi qu'un réseau de capteurs sans fil qui est un type particulier de réseau ad-hoc. Par la suite, nous avons détaillé les fonctionnalités et l'architecture d'un capteur. Nous avons cité les caractéristiques d'un réseau de capteurs et présenté quelques applications. Nous avons également mis l'accent sur le routage et la structuration virtuelle d'un réseau qui sont des points essentiels.

La classification des protocoles de routage ad-hoc a été également décrite ainsi que des méthodes utilisées par ces protocoles (Distance Vector et Link State). Nous avons ainsi pu énumérer certains protocoles de routages existants les plus connus et les plus cités. Le groupement de ces protocoles ont été classés suivant trois grandes familles auxquelles on peut les associer. C'est-à-dire les protocoles de routage proactifs, réactifs et hybrides. Chacune de ces familles possèdent des avantages et des inconvénients qui vont de pair. Pour parvenir à différencier les bonus et malus de chaque protocole de routage, nous devons mettre l'accent sur les métriques à étudier pour parvenir à un classement des protocoles viables à l'optimisation de l'énergie. Nous pourrions ainsi utiliser des bribes de ces protocoles pour ainsi parvenir à trouver un protocole servant comme modèle à l'optimisation de l'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous en avons conclu que la gamme de transmission et un nombre différent de noeuds de capteurs en tant que paramètre de système affecte la consommation d'énergie globale et le rendement du réseau de capteurs sans fil.

En effet, la portée de communication du noeud de détection est une mesure très importante qui peut avoir une influence sur la connectivité du réseau. Ce document a étudié l'impact de la plage de transmission variable

sur les indicateurs de performance des trois plus populaires et distincte protocoles fonctionnalité de routage AODV, DSR et DSDV.

En comparant ces mécanismes de routage sur la base de différents indicateurs de performance nous concluons que la portée de transmission variable offre une bonne performance pour tous les paramètres et il est plus approprié surtout pour la portée de communication haute. Enfin nous avons défini et décrit brièvement les problématiques que nous retrouvons dans la plupart des cas dans les réseaux de capteurs sans fils. Ce que nous retrouvons comme défaut récurrent dans l'objectif d'une optimisation des réseaux de capteurs sans fil est la topologie et disposition des noeuds.

En effet les protocoles de routages n'ont aucune possibilité de gérer les noeuds trop souvent sollicités et qui peuvent perturber le bon déroulement des communications dans le réseau. Nous avons essayé de donner un élément de réponse qui permettrait de soulager le réseau et ainsi décongestionnera les communications vers des noeuds que l'on nommera « noeud critique ».

Les contributions présentées dans cette thèse peuvent bénéficier d'améliorations, d'extensions et d'élargissements. Parmi les perspectives envisageables pour compléter notre étude, nous pouvons citer :

Tout d'abord, les performances de nos algorithmes ont été prouvées à l'aide du simulateur Network Simulator 2 et il serait préférable de réaliser ces études dans des conditions réelles de manière à comparer les performances réelles par rapport à celles effectuées par des simulations. Des déploiements des réseaux de capteurs sans fil dans des environnements variés, peuvent apporter des renseignements des plus intéressants pour un développement de modèles plus optimales et un protocole des plus fiables.

Nous envisageons également de généraliser les méthodes et algorithmes présentées afin de tenir compte d'une répartition non uniforme des énergies ainsi que des trafics des données dans le réseau, sans oublier des différentes pannes potentielles de capteurs qui peuvent survenir. Dans un effort d'amélioration des protocoles de routages sans fil pour optimiser la consommation énergétique, nous pouvons nous pencher sur le système de codage réseau qui dans le domaine de la fiabilisation des réseaux codés est une piste intéressante. Cela nous permettrait d'éviter des redondances de paquets envoyés sur le réseau, car cette technique se base sur un système de retransmission qui détecte la perte ou la corruption d'un paquet de donnée. ?

Finalement, dans nos futures recherches, nous envisageons d'appliquer les résultats obtenus sur un canal de propagation acoustique et ce, dans le but de localiser des objets connectés dans un environnement intérieur (indoor).

Bibliographie

- [1] Charles E. Perkins. *Ad hoc networking*. Addison-Wesley Professional, 2008.
- [2] Krishnamurthy Srikanth Mohapatra, Prasant. *AD HOC NETWORKS : Technologies and Protocols*. Springer Signals and Communication, 2005.
- [3] M. C. V. Dr Ian F. Akyildiz. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley and Sons, 2010.
- [4] Jamal El Abbadi et Patrick Garda Ahmed Habbani, Olivier Romain. Réseaux de capteurs : Systèmes d'acquisition et de routage d'informations. *Electronic Journal of Information Technology*, (2), Avril 2006.
- [5] T.S. Rappaport. *Wireless communications principles and practice 2nd edition*. chapter 1 and 6, 2002.
- [6] M. C. V. Dr Ian F. Akyildiz. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley and Sons, 2010.
- [7] Arsalan Tavakoli Kannan Srinivasan, Prabal Dutta and Philip Levis. An empirical study of low-power wireless. acm transactions on sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 6(16) :1– 49, 2010.
- [8] Datasheet tmote sky :. <http://www.eecs.harvard.edu/konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>. 2004.
- [9] A.P. Heinzelman W B, Chandrakasan. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 1 :660 – 670, Dec 2002.
- [10] Tony Ducrocq. *Auto-organisation des réseaux sans-fil multi-sauts dans les villes intelligentes*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, Novembre 2013.
- [11] Y. Chen and Q. Zhao. On the lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 9(11) :976–978, 2005.
- [12] J.N. Al-Karaki and A.E Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : A survey. *IEEE Wireless Communications*, 11 :6–28, 2004.

- [13] H. Niska et O. BrÅd'ysy T. Nuortio, J. KytÅjoki. Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *IEEE Wireless Communications*, 30 :223 Å 232, 2007.
- [14] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40 :102–114, Aug. 2002.
- [15] W. B. Heinzelman. *Application-specific protocol architectures for wireless networks*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2000.
- [16] Chee-Yee Chong and S P Kumar. Sensor networks : evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91 :1247Å1256, Aug. 2003.
- [17] C.L. Ham D.A. Knapp Z.M. Koenig S.J. Luke T.B. Gosnell, J.M. Hall. Gamma-ray identification of nuclear weapon materials. Technical report, Lawrence Livermore National Lab, Livermore,CA (USA), 1997.
- [18] Aline Baggio. Wireless sensor networks in precision agriculture. In *Real-World Wireless Sensor Networks*, Sweden, 2005.
- [19] McCarthy P. Guru S. M. Peng W. Hugo D. McCulloch, J. and Terhorst. Wireless sensor network deployment for water use efficiency in irrigation. In *Real-World Wireless Sensor Networks*, Scotland, 2008.
- [20] Jacques Panchard, Seshagiri Rao, T.V. Prabhakar, H.S. Jamadagni, and JeanPierre Hubaux. Commonsense net : A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. *The MIT Press Journal publication*, 4(1) :51Å67, 2008.
- [21] Soto F. Suardiaz J. Sanchez P. Iborra A. Lopez Riquelme, J. A. and J. A Vera. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1) :25–35, 2009.
- [22] Projet agro-sens. <https://www.hds.utc.fr/heudiasyc/catalogue-131/projets-133/projets-ro/article/agro-sens/?lang=fr>. Responsable : Yacine Challal, 2009-2013.
- [23] Philippe Hunel Harry Gros-Desormeaux Nathalie Dessart, Hac'ene Fouchal and Nicolas Vidot. Distributed decision for medical alerts using wireless sensors. *IEE World Of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WOWMOM)*, pages 1–6, 2009.
- [24] I. Bachelet S.M. Douglas and G.M. Church. A logic-gated nanorobot for targeted transport of molecular payloads. *Science journal*, 335 :831–834, 2012.
- [25] Technnology review : Tracking a shopper's habits. <http://www.technologyreview.com/computing/21161/>. Michael Fitzgerald, August 2008.
- [26] D.C. Petriu D. Makrakis E.M. Petriu, N.D. Georganas and V.Z. Groza. Sensor-based information appliances. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 3(4) :31–35, December 2000.

- [27] M Bhardwaj and A.P Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. *in Proceedings of the 21st IEEE INFOCOM*, 13(4), January 2011.
- [28] Pravin Bhagwat Charles E. Perkins. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review.*, 24, 1999.
- [29] Deshpande P.P. Gireesh Hegde B. Chetan, B.M and S Srinivas. Analysis of dsv and aodv for disaster management system in coal mines. *IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, Sept. 2011.
- [30] H. Karl and Willig. *Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks*. John Wiley and Sons, Hoboken, 2005.
- [31] CÃrdric Adjih Anis Laouiti. Mesures de performances du protocole olsr. projet hipercom. Technical report, Project-Team Hipercom, INRIA, 2003.
- [32] P. Jacquet et T. Clausen. Optimized link state routing protocol (olsr). Technical report, IETF RFC3626, Octobre 2003.
- [33] A.H. Cevik, T. Zaim. Localized energy efficient routing for wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, 2011.
- [34] David A. Maltz David B. Johnson and Josh Broch. *The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks*. In Mobile Computing, Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [35] A. Almutairi and T. Hendawy. Performance comparison of dynamic source routing in ad-hoc networks. *IEEE-GCC Conference*, 2011.
- [36] S. R. Das. C. E. Perkins, E. M. Royer. Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing. *In IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-05.txt*, 2003.
- [37] J.M Shah, R.C. ; Rabaey. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1, 2002.
- [38] Pankaj Sharma Charu Gupta. Implementation of energy aware routing protocol for mobile ad hoc networks. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 3, 2013.
- [39] Nini Wei ; Yi Song. An energy-aware routing strategy based on dynamic priority factor in ad hoc networks. *International Conference on Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences (ICM)*, 2, 2011.
- [40] J. Chang-jiang et Z. Ying X. Min, S. Weiren. Energy efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks. *International Journal of Electronics and Communications*, 64(4), 2010.
- [41] H. Karl and A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2005.

- [42] H. Balakrishnan, W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, 2, 2000.
- [43] L. Han. Leach-hpr : An energy efficient routing algorithm for heterogeneous wsn. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS)*, 2, 2011.
- [44] H. ; Ghiasian A. ; Hashemi M.R. Amiri, S. ; Saidi. Enhanced lifetime maximization algorithm for wireless sensor network. *IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2, 2011.
- [45] The network simulator ns-2 : Documentation. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- [46] O. Salvatori et J. Nozick G. Pujolle. *Les réseaux*. Editions Eyrolles, 2010.
- [47] A. Woo and D.E. Culler. A transmission control scheme for media access in sensor networks. *In Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*,, 2001.
- [48] M. Younis K. Akkaya. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3), 2005.
- [49] Maarten Ditzel and Frans H. Elferink. Low-power radar for wireless sensor networks. *In Proceedings of the 3rd European Radar Conference (EuRAD'06)*, September 2006.
- [50] Palanivelu T.G. Tamilarasi M. Integrated energy-aware mechanism for manets using on demand routing. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008.
- [51] Maha Ben Zid Ridha Bouallegue Mehdi Bouallegue, Kosai Raoof. Impact of variable transmission power on routing protocols in wireless sensor networks. *IEEE 10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (Wicom14)*, Beijing September 2014.
- [52] S. Yoon S. Santini U. Colesanti S. Giordano et L. Guibas D. Puccinelli, O. Gnawali. The impact of network topology on collection performance. *Wireless Sensor Networks Lecture Notes in Computer Science*, 6567, Heidelberg, 2012.
- [53] Marco Bragalini Ozan K. Tonguz Gianluigi Ferrari, Simone A. Malvassori. Physical layer-constrained routing in ad-hoc wireless networks :a modified aodv protocol with power control. *IWWAN*, 2007.
- [54] Ridha Bouallegue Mehdi Bouallegue, Kosai RAOOF. Design and implementation of new routing strategy for enhanced energy efficient in wsn. *International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC)*, 7(4), June 2015.
- [55] T. S. Rappaport et al. *Wireless communications : principles and practice volume 2*. Prentice Hall PTR New Jersey, 1996.

Liste des publications

Publications dans des revues scientifiques internationales à facteur d'impact

1. **Mehdi Bouallegue**, kosai Raof and Ridha Bouallegue , « *Design and Implementation of New Routing Strategy for Enhanced Energy efficient in WSN* », The International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC), Vol. 7, No. 4 , pp 127-137, July 2015.

Publications dans des revues scientifiques internationales à facteur d'impact

1. **Mehdi Bouallegue**, kosai Raof and Ridha Bouallegue : « *Dynamic source energy aware routing protocole for Manet* », December 2015, wireless Personal Communication Springer journal.

Publications dans des congrès internationaux (à comité de lecture)

1. **Mehdi Bouallegue**, Ridha Bouallegue and Kosai Raof , « *Extensive Simulation Performance Analysis of Variable Transmission Power on Routing Protocols in Mobile Sensor Networks* », Mediterranean Conference on Information and Communication Technologies (MEDICT 2015), May 7-9, 2015, Morocco.
2. **R. Anane**, Mehdi Bouallegue, K. Raof and R. Bouallegue, « *Achieving Energy Efficient and Reliable Communication in WSN with Coded GMSK System under various Channel Conditions* », The International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2015, **classé B**) , Croatie, August 24-27.

3. **Mehdi Bouallegue**, Kosai Raouf, Ridha Bouallegue, Maha B.Zid « *Impact of variable transmission power on routing protocols in wireless sensor networks* », 10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOMŠ14, **classé C**), pp. 500Ű507, Beijing, September 26-28, 2014.

