

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département Informatique



Mémoire de fin d'étude

En vue d'Obtention du Diplôme de Master en Informatique
Option : Réseaux et Systèmes Distribués.

Le routage multi chemins avec QoS dans les réseaux de capteurs sans fil

Réalisé par :

Mlle BENARAB Asma.

Président :	M ^r A. BAADACHE,	M.C.B,	Université de Béjaïa.
Examineur :	M ^r M. SAADI,	M.A.A,	Université de Béjaïa.
Examineur :	M ^{me} S. LAHLAH,	Doctorante,	Université de Béjaïa.
Encadreur :	M ^{me} L. BOUALLOUCHE,	M.C.A,	Université de Béjaïa.
Co-Encadreur :	M ^{elle} A. TIAB,	Doctorante,	Université de Béjaïa.

2012-2013

* * * * *Remerciements* * * * *

En premier lieu, je remercie le Bon Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce modeste travail et qui m'a procuré ce succès.

Mes très vifs remerciements vont à l'encontre de mes encadreurs Mme BOUALOUCHE Luiza et Mlle TIAB Amel, pour avoir accepté de m'encadrer et de m'orienter tout au long de ce travail, je les remercie une deuxième fois pour leur patience, leur sympathie et leurs conseils.

Je remercie vivement Mr HAMOUDI Samir pour tous les efforts qu'il a fournis, sa disponibilité et ses conseils toute au long de ce travail et tous les enseignants de département d'Informatique de l'université A.Mira de Béjaia pour tous les efforts qu'ils ont fournis toute au long de cette formation.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Un merci particulier à mes parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leurs patiences.

Un énorme merci à ma famille et amis pour leurs éternel soutien et la confiance qu'ils ont en ma capacité.

Que toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, m'a aidée et encouragée à l'aboutissement de ce travail, trouve ici l'expression de mes sincères reconnaissances.

** * * * Dédicaces * * * **

Je dédie ce modeste travail:

*À ma chère mère pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde;
À mon père qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier;
pour que je puisse franchir tout obstacle durant toutes mes années d'étude;
À mes frères : Lyes Younes et Fares et ma soeur Leila;
À mes cousins et cousines, particulièrement Yacine;
À mes oncles et tentes;
À toute ma grande famille;
À tous mes amis dont la liste est longue; Sabrina, Dahia, Mounia, Kahina, Nawel,
Lilya...;
À la promotion Informatique 2013 et à la D13 ;
Enfin à tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment;
J'exprime mes sentiments les plus profonds;
Et leur dédie ce modeste travail.*



Table des Matières

Table des Matières	i
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	v
Introduction Générale	1
1 Présentation des réseaux de capteurs sans fils	3
1.1 Introduction	3
1.2 Du capteur au réseau de capteurs sans fil	4
1.2.1 Un capteur	4
1.2.2 Un réseau de capteur sans fil	6
1.3 Collecte d'informations	7
1.4 Pile de communication	9
1.5 Caractéristiques et contraintes conceptuelles	10
1.5.1 Densité des nœuds	10
1.5.2 Topologie dynamique	10
1.5.3 Auto-organisation	11
1.5.4 La tolérance aux pannes	11
1.5.5 Scalabilité	11
1.6 Types des flux de trafic de données	11
1.7 Applications des RCSFs	12
1.7.1 Applications militaires	12
1.7.2 Applications environnementales	12
1.7.3 Applications médicales	12
1.7.4 Applications liées à la sécurité	13
1.7.5 Applications commerciales	13
1.7.6 Applications Domotique	14
1.8 Problèmes relatifs aux RCSFs	14
1.9 La QoS et les RCSF	15
1.9.1 Définition de la QoS	15
1.9.2 Exigences de la QoS dans les RCSFs	15

1.9.3	La QoS à différentes échelles	16
1.9.4	Métriques de la QoS	16
1.10	Conclusion	17
2	Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil	18
2.1	Introduction	18
2.2	Problématique de routage dans les RCSFs	18
2.3	Facteurs de conception de protocoles de routage	19
2.3.1	Déploiement des nœuds	19
2.3.2	Consommation d'énergie	19
2.3.3	Modèle de transmission	20
2.3.4	Tolérance aux pannes	20
2.3.5	Scalabilité	20
2.4	Métriques de routage	20
2.4.1	Métriques applicables à toutes les architectures des RCSF	21
2.4.2	Métriques significatives seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie	22
2.5	Les approches de routage dans les RCSFs	23
2.5.1	Classification Selon la structure du réseau	24
2.5.2	Classification Selon l'établissement de routes	25
2.5.3	Classification Selon l'initiateur de communication	26
2.5.4	Classification Selon la fonction du protocole	27
2.6	Le paradigme multi-chemins dans les RCSFs	29
2.6.1	Principes de base dans la désignation des chemins multiples	29
2.6.2	Routage multi-chemins avec QoS dans les RCSFs	30
2.7	Conclusion	31
3	Les protocoles de routage multi-chemins dans les RCSFs	32
3.1	Introduction	32
3.2	Le routage multi-chemins dans les RCSFs	32
3.2.1	Motivations	32
3.3	Critères de comparaison	33
3.4	Etude comparative des protocoles de routage multi-chemins	33
3.4.1	E2AOMDV: Energy Efficient Ad Hoc On Demand Multipath Distance Vector Routing Protocol	34
3.4.2	EQSR: Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks	35
3.4.3	Improving Lifetime and Reliability in Routing Real-Time Wireless Sensor Networks based on Hybrid Algorithm	38
3.4.4	QEMPAR: QoS and Energy Aware Multi-Path Routing Algorithm for Real-Time Applications in Wireless Sensor Networks	39

3.4.5	QoSNET : An integrated QoSNETwork for routing protocols in large scale wireless sensor networks	41
3.4.6	MMSPEED: Multipath Multi SPEED	43
3.4.7	LIEMRO: Low-InterferenceEnergy-Efficient Multipath Routing Protocol	44
3.5	Synthèse des protocoles étudiés	46
3.6	Conclusion	46
4	Le protocole QoS-based E2AOMDV	49
4.1	Introduction	49
4.2	Contexte et Motivation	50
4.3	Le principe général de la solution proposée	50
4.4	Hypothèses	50
4.5	Description détaillée du protocole Qos-based E2AOMDV	51
4.5.1	Phase de construction de chemins	51
4.5.2	Répartition de trafic et transmission de données	53
4.5.3	Décodage et Récupération	55
4.5.4	L'organigramme du protocole:	55
4.6	Conclusion	56
	Conclusion Générale	57
	Bibliographie	59

LISTE DES FIGURES

1.1	Un capteur sans fil.	4
1.2	Architecture d'un capteur.	5
1.3	Architecture d'un réseau de capteur.	7
1.4	Modélisation d'un réseau de capteur.	7
1.5	Collection des informations à la demande.	8
1.6	Collection des informations suite à un évènement.	9
1.7	Pile protocolaire.	9
1.8	Les RCSFs pour les applications médicales.	13
2.1	Taxonomie de protocoles de routage dans les RCSF.	23
2.2	Résumé des principaux algorithmes de routage selon la topologie du réseau.	25
3.1	La vitesse d'avancement du nœud A au nœud B en direction du nœud destination.	43
4.1	Structure de message RREQ	52
4.2	Format du paquet (message originale et les codes de correction).	55
4.3	Organigramme du protocole QoS-based E2AOMDV	56

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins.	47
4.1	Sélection fondée sur l'état de préparation de l'énergie.	52
4.2	Quelques valeurs de la borne α	53

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil sont de plus en plus populaires du fait de leur facilité de déploiement et de la multifonctionnalité des nœuds de capteurs. Ces réseaux jouent un rôle crucial au sein des réseaux informatiques et ont été utilisés pour une variété d'applications telles que la santé, la poursuite de cibles et la surveillance de l'environnement. Cependant, il y'a besoin de garantir une qualité de services de sorte que la technologie puisse être adoptée avec succès. Particulièrement en termes de fiabilité tout en respectant les limites des capacités inhérentes à ce type de réseau (bande passante, énergie, mémoire ..). De plus, en raison de la restriction de la portée de communication et la forte densité des nœuds capteurs, le transfert de paquets dans les RCSFs est généralement réalisé par une transmission de données multi-sauts. Par conséquent, le routage dans les RCSFs a été considéré comme un domaine de recherche important au cours des dernières décennies.

Généralement, le routage permet d'établir une route de plus court chemin en terme de distance ou de délai entre deux nœuds source et destination. Dans le cadre d'une qualité de service, le but du protocole de routage est de trouver la meilleure route selon les critères précis de la qualité de service souhaitée (délai, taux de perte, quantité de bande passante, ...), et reposant sur des liens fiables. Cette question a motivé la communauté scientifique des RCSFs pour développer des protocoles de routage multi-chemins qui sont plus appropriés aux réseaux de capteurs sans fil et qui offrent des fins de gestion tels que l'amélioration de la fiabilité de transmission des données, une tolérance aux fautes et un contrôle de congestion. Dès lors, les techniques de routage multi-chemins sont considérées comme une approche efficace pour améliorer la capacité du réseau et l'utilisation des ressources dans des conditions de communication dense.

Notre travail rentre dans le cadre du projet de fin d'études et s'inscrit dans le contexte des protocoles de routage multi-chemins avec QoS dans les réseaux de capteurs sans fil. Le principal objectif étant de faire une initiation à la recherche, nous avons élaboré un état de l'art des réseaux de capteurs sans fil et des techniques de routage existantes, notamment la technique de routage multi-chemins. Nous avons également parcouru et critiqué certaines solutions présentées dans la littérature et ce qui nous a permis par la suite de proposer une solution efficace et enfin évaluer les performances de cette dernière.

En effet notre solution consiste en un protocole de routage multi chemins dont l'objectif est la garantie de la QoS tout en respectant les contraintes inhérentes aux réseaux de capteurs sans fil. Notre protocole s'intitule QoS-based E2AOMDV (*Quality of Service based Energy Efficient Ad hoc On Demand Multipath Distance Vector*), car il représente une amélioration du protocole E2AOMDV existant, par l'intégration d'un nouveau mécanisme de transmission des données basé sur la notion de codage réseau présenté dans le protocole EQSR afin de garantir la QoS en termes de fiabilité et de délai tout en préservant l'énergie. La suite de ce mémoire sera organisée comme suit :

- Le chapitre 1, présente un aperçu général sur les réseaux de capteurs : leurs architectures, leurs principales caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que les contraintes de conception d'un tel type de réseau.
- Le chapitre 2 est consacré à la problématique du routage dans les RCSFs. Les facteurs influant sur la conception des protocoles de routage, les différentes classes de ces protocoles. Nous avons donné un intérêt particulier à la classe des protocoles de multi-chemins.
- Le chapitre 3 dresse un état de l'art des protocoles de routage multi-chemins dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous présentons d'abord le principe de chaque protocole suivi d'un ensemble de critiques. Puis, nous comparons les protocoles étudiés suivant certain paramètres de qualité de service jugés importants dans les RCSFs.
- Le chapitre 4, sera consacré à la présentation de notre contribution, qui consiste en un protocole de routage multi-chemins dont l'objectif est la garantie de la QoS tout en respectant les contraintes inhérentes aux réseaux de capteurs sans fil.
- Enfin, notre travail s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés ainsi que les perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

1

Présentation des réseaux de capteurs sans fils

1.1 Introduction

Les progrès réalisés ces dernières décennies dans les domaines de la microélectronique, de la micromécanique et des technologies de communication sans fil, ont permis de produire à un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. De ce fait, un nouveau domaine de recherche s'est créé pour offrir des solutions économiquement intéressantes et facilement déployables à la surveillance à distance et au traitement des données dans les environnements complexes et distribués : les réseaux de capteurs sans fil.

Les réseaux de capteurs sans fil sont constitués de nœuds déployables en grand nombre en vue de collecter et transmettre des données environnementales vers un ou plusieurs points de collecte, d'une manière autonome. Le présent chapitre présente les réseaux de capteurs sans fil, leur architecture, caractéristiques, utilités et les contraintes régissant de tels réseaux.

1.2 Du capteur au réseau de capteurs sans fil

1.2.1 Un capteur

1.2.1.1 Définition

Un capteur est un dispositif électronique de taille extrêmement réduite, capable de capturer, de mémoriser, de traiter des informations de l'environnement dans lequel est déployé (lumière, pression, son, image, température, vitesse, mouvement, etc.) et de les communiquer à une autre entité (capteur, station de base, .) sur une distance limitée à quelques mètres. Les capteurs sont peu coûteux mais limités en terme de ressources (mémoire, énergie, calcul) utilisés pour réaliser, de manière autonome des tâches comme la surveillance, le contrôle de processus industriels, etc.



Figure 1.1: Un capteur sans fil.

1.2.1.2 Architecture

Matérielle: Un capteur est composé principalement de quatre unités élémentaires qui sont :

- **Unité de perception:** On retrouve des équipements de différents types de détecteur et d'autre entrée. Le capteur comprend deux sous unités : le capteur lui-même (Récepteur): reconnaissant l'analyste qui est chargé de fournir des signaux analogiques basés sur le phénomène observé et un Convertisseur (Transducteur) Analogique/Numérique qui transforme les signaux issus du capteur en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- **Unité de traitement:** Constitue l'élément central du capteur. Elle comprend un processeur associé à une petite unité de stockage (la mémoire). Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communication permettant au nœud de collaborer avec le reste du réseau comme elle peut analyser les données pour alléger la tâche du nœud puits.
- **Unité de communication:** Les équipements étudiés sont donc généralement équipés d'une radio ainsi que d'une antenne. Cette unité est responsable de toutes les émissions

et réceptions des données sur un médium de communication sans fil (radio, infrarouge, optique, etc.) qui relie le nœud au réseau. Elle peut être de type radiofréquence ou optique (comme dans les nœuds Smart Dust). Cette dernière est robuste vis-à-vis des interférences électriques.

- **Unité de contrôle d'énergie** : Un capteur est muni d'une ressource énergétique (la batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, à cause de sa taille réduite, la ressource énergétique dont le capteur dispose est limitée et généralement irremplaçable. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteur ; en raison de son influence directe sur la durée de vie des capteurs et du réseau entier.

Un capteur peut être doté d'autres modules additionnels suivant son domaine d'application telqu'un système de localisation, ou un générateur d'énergie (cellules solaires) ou encore un système mobilisateur lui permettant le déplacement en cas de nécessité. La figure .2 présente les differntes unités et la manière avec laquelle sont interconnectées [1].

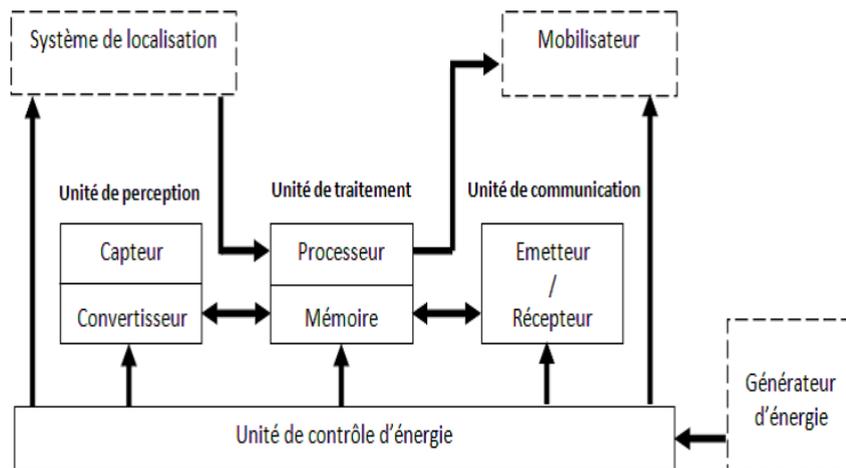


Figure 1.2: Architecture d'un capteur.

Logicielle: Un capteur est doté d'un système d'exploitation Open Source appelé : " TinyOS " [] intégré, modulaire, destiné aux réseaux de capteurs. En effet, TinyOS est le plus répandu des systèmes d'exploitation pour les réseaux de capteurs car il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant ainsi la taille du code nécessaire à sa mise en place. TinyOS s'appuie sur un fonctionnement évènementiel, c'est à dire qu'il ne devient actif qu'à l'apparition de certains évènements, par exemple l'arrivée d'un message radio. Le reste du temps, le capteur se trouve en état de veille, garantissant ainsi une durée de vie maximale.

1.2.2 Un réseau de capteur sans fil

1.2.2.1 Définition

Un réseau de capteur sans fil (RCSF) est considéré comme étant un type spécial des réseaux Ad hoc avec un nombre plus important de nœuds. Ces derniers sont déployés aléatoirement (par exemple par voie aérienne à l'aide d'un avion) ou de façon uniforme dans des environnements généralement hostiles interconnectés via un lien sans fil (radio, optique, etc.) [5].

Les nœuds capteurs jouent, à la fois le rôle d'hôte et de routeur. En effet, un capteur analyse son environnement, et propage les données récoltées aux capteurs se trouvant dans sa zone de couverture. Chaque capteur relayant l'information sur sa propre zone de couverture, le réseau se trouve ainsi entièrement couvert.

1.2.2.2 Architecture

Deux types de nœuds capteurs peuvent être distingués : capteurs (nœuds ordinaires) et nœuds puits. Un nœud capteur capte des phénomènes physiques et surveille son environnement immédiat pour transmettre les données captées au nœud puits. Ce dernier, les collecte, les stocke et les analyse pour communiquer les résultats à d'autres réseaux auxquels il est connecté via Internet ou par Satellite.

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans un champ de capture "sensor-field". Les données captées par les nœuds sont acheminées par routage à un nœud considéré comme un "point de collecte", appelé nœud-puits (ou sink). À son tour, le nœud de contrôle transmet les informations reçues à partir d'Internet ou par satellite à l'utilisateur final. L'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, en précisant le type de données requises et récolte les données environnementales captées par le biais du nœud puits.

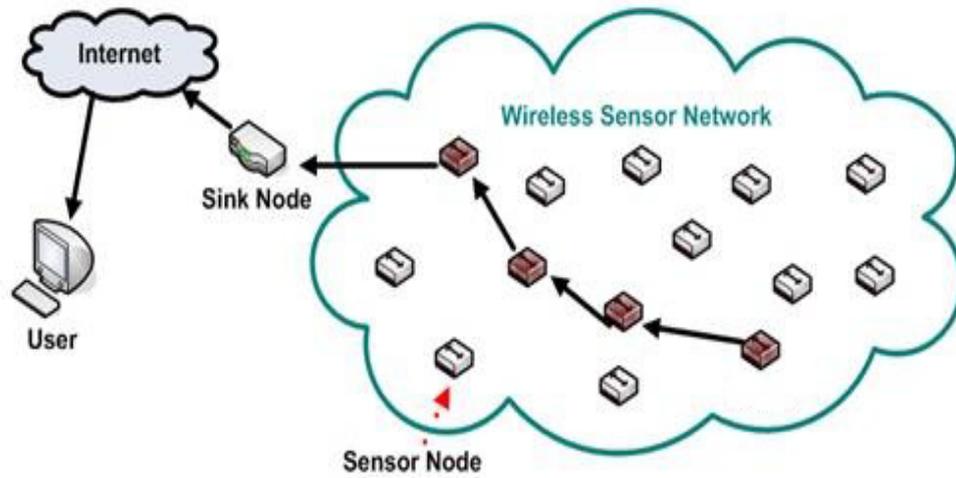


Figure 1.3: Architecture d'un réseau de capteur.

1.2.2.3 Modélisation

Un réseau de capteur peut être modélisé par un graphe non orienté $G = (V, E)$ tel que :

V : représente l'ensemble des nœuds mobiles.

E : représente l'ensemble des arrêtes (connexion entre les nœuds).

En effet, si l'arrête $e = (u, v)$ existe, cela signifie que le nœud u et v sont à portée l'un de l'autre et communiquent directement.

La figure suivante représente un réseau de capteur à 8 nœuds sous forme d'un graphe :

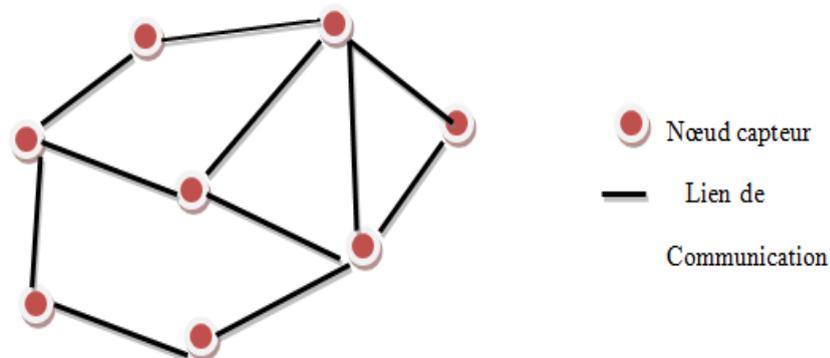


Figure 1.4: Modélisation d'un réseau de capteur.

1.3 Collecte d'informations

Il y a deux méthodes pour collecter les informations d'un réseau de capteurs sans fils.

- A la demande

Lorsque l'on souhaite avoir l'état de la zone de couverture à un moment t , le nœud puits émet des broadcasts vers toute la zone pour que les capteurs remontent leur dernier relevé vers le nœud puits. Les informations sont alors acheminées par le biais d'une communication multi-sauts comme ils sont indiqués sur la figure 1.5.

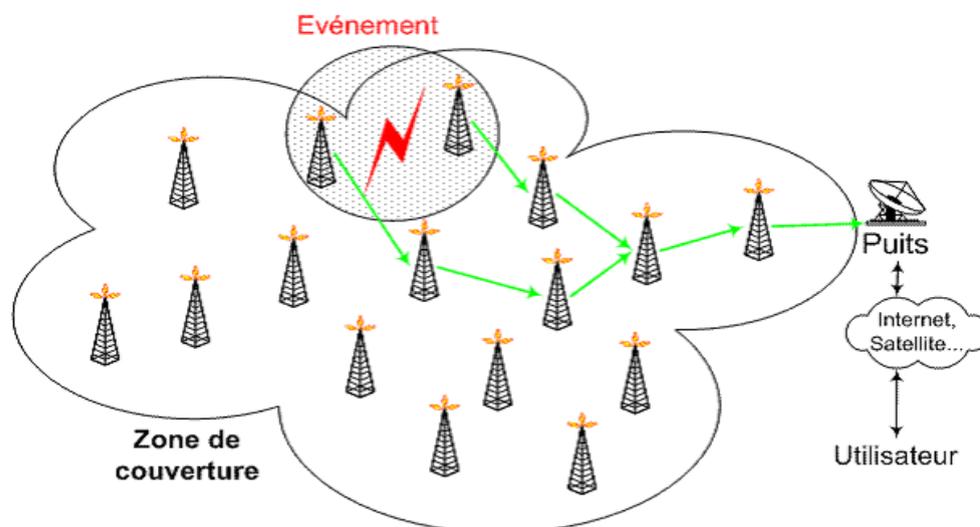


Figure 1.5: Collection des informations à la demande.

- Suite à un évènement

Un événement se produit en un point de la zone de couverture (changement brusque de température, mouvement ..), les capteurs situés à proximité remontent alors les informations relevées et les acheminent jusqu'au nœud puits comme ils sont indiqués sur la figure 1.6.

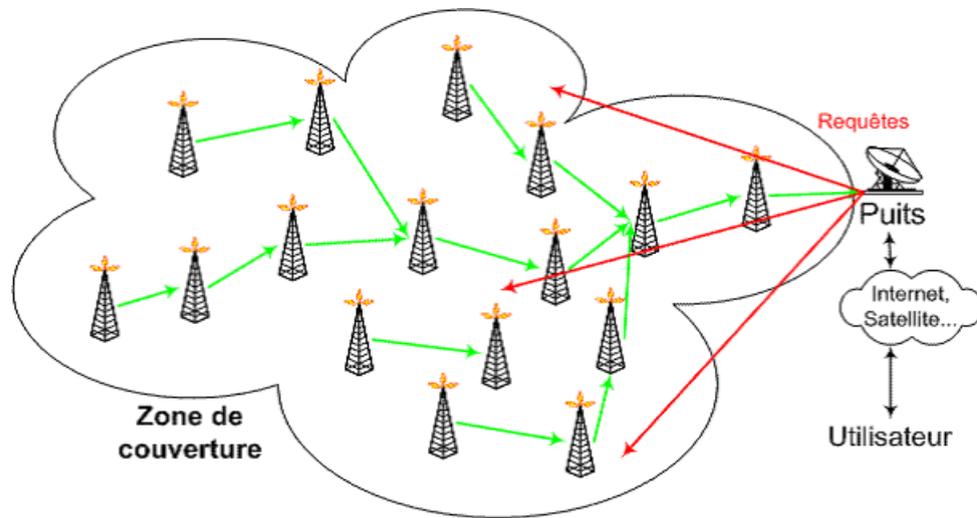


Figure 1.6: Collection des informations suite à un évènement.

1.4 Pile de communication

Pour gérer la communication entre capteurs, l'approche généralement retenue est la même que dans les réseaux classiques, à savoir la constitution d'une pile de communication dans laquelle chaque couche possède un rôle tout particulier. La pile communique de manière efficace en termes d'énergie à travers le support sans fil et favorise les efforts de coopération entre les nœuds capteurs. Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs [1].

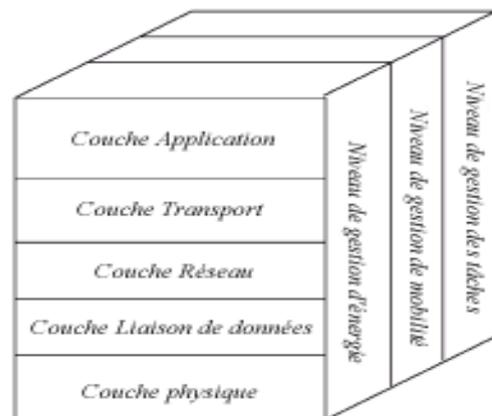


Figure 1.7: Pile protocolaire.

La couche physique : doit assurer des techniques d'émission, réception et modulation de données simples mais robustes.

La couche liaisons de données : responsable du multiplexage des flux de données, et le contrôle d'erreurs, tandis que la sous couche MAC doit garantir une faible consommation d'énergie et un taux de collision minimum entre les données diffusées par les nœuds voisins.

La couche réseau: s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.

La couche transport: sert à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées, particulièrement lors d'une connexion avec Internet.

La couche application : différentes applications peuvent être utilisées selon les tâches de détection.

Les niveaux de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches sont responsables du contrôle de l'énergie consommée, des mouvements des nœuds et de la distribution des tâches à travers toute la pile protocolaire, ces niveaux permettent aux capteurs de coordonner leurs tâches et minimiser la consommation d'énergie.

1.5 Caractéristiques et contraintes conceptuelles

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres [2], parmi lesquels:

1.5.1 Densité des nœuds

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important des nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capteur.

1.5.2 Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs instable est le résultat des trois facteurs essentiels:

- La mobilité des nœuds: les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- La défaillance des nœuds: du fait de l'autonomie énergétique limitée des nœuds, la topologie du réseau n'est pas fixée (les nœuds " morts " sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés).
- L'ajout de nouveaux nœuds: de nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant.

1.5.3 Auto-organisation

L'auto organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Vu les différentes raisons résultant une topologie instable du réseau de capteur sans fil, ce dernier devra être capable de s'auto-organiser pour continuer ses applications.

1.5.4 La tolérance aux pannes

Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruptions en cas de défaillance d'un ou plusieurs de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, ou par dommage physique ou interférence de l'environnement. Le degré de tolérance dépend du degré de criticité de l'application et des données échangées.

1.5.5 Scalabilité

Les réseaux de capteurs sans fils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter-nodales et nécessite que le nœud " Sink " soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les informations reçues.

1.6 Types des flux de trafic de données

Les modèles des flux de trafic de données [3] les plus utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil sont décrits ci-après.

- Périodique: chaque capteur dans le réseau envoie périodiquement des paquets aux destinations. La plupart des applications génèrent du trafic périodique.
- Événementiel: les capteurs envoient des paquets aux destinations lorsqu'ils détectent un événement. Par exemple, dans les applications de surveillance, un capteur n'envoie des paquets que s'il détecte une présence dans la zone qu'il surveille.
- Requête/réponses: un contrôleur du réseau envoie une requête à un sous ensemble du réseau pour demander une information particulière. Cet ensemble envoie des paquets aux destinations en réponse à cette requête. Par exemple, dans une application de télésurveillance médicale, le médecin envoie une requête pour demander l'état actuel des signes vitaux d'un patient.
- Hybride: dans lequel une application utilise un ou plusieurs types de trafic, qu'on vient de décrire, à la fois. De plus en plus d'applications utilisent ce modèle de nos jours. Par exemple, l'application de télésurveillance médicale peut utiliser tous les types de trafic à la fois. Les capteurs envoient d'une façon périodique l'état des fonctions vitales du patient. Si entre temps un problème est détecté, un événement

est transmis au professionnel de santé. Ce dernier peut envoyer une requête pour vérifier l'état du patient à un instant donné.

1.7 Applications des RCSFs

La recherche dans le domaine des RCSF subit actuellement une révolution importante et leurs applications prennent de plus en plus d'ampleur dans plusieurs domaines, nous citons entre autres:

1.7.1 Applications militaires

Un réseau de capteurs sans fils 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). 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) [7] au DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 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) [8]. Ce réseau est composé de détecteurs des rayons gamma et des neutrons pour détecter et dépister les dispositifs nucléaires. Il est capable d'exécuter la surveillance constante d'une 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) [6] pour avertir les troupes dans le champ de bataille des attaques biologiques possibles.

1.7.2 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sans fils peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, tels que la température, la pression atmosphérique, etc. En dispersant des nœuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements tels que les feux de forêts, les tempêtes, les inondations, la pollution des industries (les déchets industriels). Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.

1.7.3 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs sans fils 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 donnent la possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies en

effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient [10]. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).

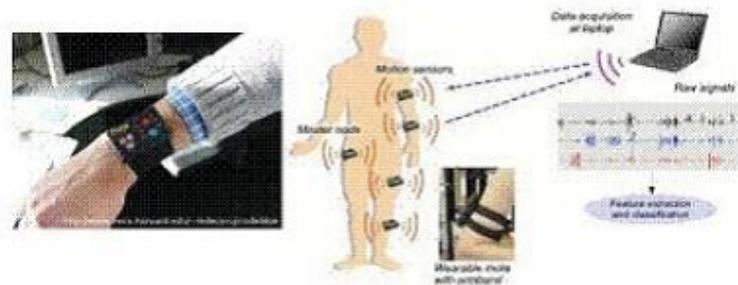


Figure 1.8: Les RCSFs pour les applications médicales.

1.7.4 Applications liées à la sécurité

L'application des réseaux de capteurs sans fils dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les budgets consacrés à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant des résultats plus fiables. Comme exemple d'applications de ce type nous pouvons citer :

- La détection des altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton,
- La surveillance des mouvements afin de constituer un système de détection d'intrusions distribué.

L'aspect distribué rend plus complexe la possibilité de mettre en usage ce système de surveillance.

1.7.5 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourrait 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 paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré.

1.7.6 Applications Domotique

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. 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 se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison [2].

1.8 Problèmes relatifs aux RCSFs

Plusieurs problématiques ont été soulevées dans le domaine des réseaux de capteurs, nous citons entre autres :

- **Le routage** : Consiste en l'acheminement des informations vers une station donnée à travers un réseau de connexion. Le problème de routage consiste à concevoir un protocole de routage performant en termes de minimisation de la consommation de l'énergie, du choix des routes optimales pour l'acheminement de l'information d'un capteur à la station de base et vice versa, et de réduction du délai de délivrance des paquets.
- **Qualité de service**: Dans les réseaux de capteurs sans fils, chaque couche doit supporter la qualité de service pour les communications temps réel. Un premier problème important est que, dans ce contexte, à l'heure actuelle, il y a peu de protocoles (couches MAC et réseau) qui fournissent de la QoS car les efforts majeurs ont été portés sur le développement des solutions de communication à basse consommation d'énergie.
- **Accès au médium**: La spécificité des réseaux de capteurs sans fil mobiles nécessite le développement de nouveaux protocoles MAC qui s'adaptent aux contraintes imposées par ces réseaux. Ceci dans le but d'améliorer le débit, minimiser la consommation d'énergie, optimiser le partage du médium ainsi que minimiser le délai de délivrance des paquets.
- **Sécurité**: Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité, et d'intégrité doivent être mis en place au sein de leur communauté. Les algorithmes de cryptographie conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte des ressources limitées que présentent ces réseaux.

- **Couverture:** La principale fonction d'un réseau de capteurs sans fils consiste à surveiller une zone d'intérêt sous les différentes contraintes que présentent les nœuds capteurs. Cette surveillance doit satisfaire un certain nombre d'exigences, notamment la durée de vie maximale du réseau et la qualité de surveillance. Pour cela, il est important de planifier et d'organiser l'activité des capteurs du réseau afin de réaliser la tâche voulue de manière efficace.

1.9 La QoS et les RCSF

A cause de la nature critique et urgente de certaines informations issues des capteurs notamment la détection d'une intrusion, le changement d'état d'un malade ou l'augmentation excessive de la température, les transferts de données dans les réseaux de capteurs sans fil présentent des contraintes temporelles sévères pour garantir une réponse rapide. On parle alors de support de Qualité de Service[11].

1.9.1 Définition de la QoS

La recommandation E.800 (09/2008) de l'union internationale des télécommunications (UIT) a défini la qualité de service (Quality of Service QoS) comme étant "l'Ensemble des caractéristiques d'un service de télécommunication qui lui permettent de satisfaire aux besoins explicites et aux besoins implicites de l'utilisateur du service". Une caractéristique est définie comme étant la "propriété qui aide à faire la distinction entre les individus d'une population donnée". La QoS demandée par un utilisateur reflète ses besoins en matière de qualité de fonctionnement eux même exprimés en termes descriptifs (critères) et énumérés par ordre de priorité, une valeur préférée étant donnée pour chaque critère (E.800 (09/2008)). L'administrateur du réseau quantifie cette demande en utilisant des métriques de QoS tel que la bande passante, le délai, la fiabilité, etc.

1.9.2 Exigences de la QoS dans les RCSFs

Dans la communication sans fil, la Qualité de Service correspond à un niveau d'exigence lié aux besoins de l'application[12]. Ces niveaux sont établis à partir de différents critères ou grandeurs propres aux réseaux tels que la bande passante disponible, le délai de communication, le taux de perte de paquets. Le contexte des RCSFs constitués de nœuds mobiles disposant de ressources limitées complique la définition et le respect de la QoS. Une application spécifie ses exigences à un réseau sous la forme de besoins traduits en un ensemble d'attributs mesurables : délai de bout en bout, variance de délai (gigue), débit (ou bande passante), taux de pertes de paquets. Les besoins exprimés dépendent des caractéristiques du trafic de l'application. La notion de QoS est donc subjective.

Lorsque plusieurs routes vers une destination sont disponibles, le choix de la route dépend des attributs mesurables déduits des besoins exprimés. La capacité d'un réseau à garantir une qualité du service (QoS) demandée est liée aux caractéristiques intrinsèques

de ses composants. D'un point de vue de l'architecture protocolaire, la qualité du service fournie par le réseau n'est pas liée uniquement à la couche réseau (le routage), elle nécessite des efforts coordonnés des couches MAC (Medium Access Control) et transport.

1.9.3 La QoS à différentes échelles

La question de la QoS dans les réseaux de capteurs sans fils peut être abordée à différentes échelles: interne, locale et globale. Pour garantir la QoS, il faut, dans tous ces cas, mesurer différents paramètres caractéristiques des performances du réseau tels que la bande passante disponible, le délai de transmission et la fiabilité.

- interne: intégration au niveau de la couche MAC du modèle OSI de chaque nœud du réseau;
- locale: intégration au niveau du protocole de routage, c'est-à-dire dans le voisinage proche des nœuds du réseau ;
- globale: intégration de bout en bout entre la source et la destination au sein du réseau.

1.9.4 Métriques de la QoS

La QoS correspond à des critères de performances que doit avoir le réseau pour satisfaire les besoins des utilisateurs. Ces performances correspondent à différents paramètres mesurables sur le réseau tels que [13] :

- Fiabilité: c'est la réussite de réception d'informations et dans le bon ordre.
- Délai: c'est le temps mis pour transférer un paquet entre deux nœuds ;
- Gigue: c'est la variation de l'intervalle de temps entre deux paquets durant leur acheminement entre la source et la destination ;
- Bande passante: c'est le volume total d'informations que peut absorber un lien entre deux nœuds sans créer de file d'attente ;
- Perte de paquets: c'est le nombre de paquets perdu par rapport au nombre de paquets émis.

En fonction des applications considérées, le paramètre à prendre en compte varie : par exemple, pour de la vidéo [Hurbain 03], les paramètres importants sont la bande passante, la gigue et le délai ; pour un échange de fichiers, il vaut mieux limiter la perte de paquets.

1.10 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu un succès grandissant au sein des communautés scientifiques et industrielles depuis leur invention grâce aux avantages qu'ils offrent comme l'autonomie énergétique et la facilité de déploiement. Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux des réseaux de capteurs sans fil, notamment les principales définitions, l'architecture, les types de communication, les caractéristiques et les contraintes conceptuelles, les applications ainsi que les problèmes relatifs aux RCSFs. Le chapitre suivant sera consacré à la problématique de routage dans ce type de réseaux.

2

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

La conception des protocoles de routage spécifiques aux réseaux de capteurs sans fils a attiré une grande part d'intention des chercheurs dans le domaine. Ceci, car d'une part ces protocoles peuvent varier suivant leurs applications et l'architecture du réseau déployée, et d'autre part, ils doivent surmonter certains défis inhérents qui distinguent ce type de réseau des autres réseaux tels que les réseaux cellulaires ou les réseaux mobiles Ad hoc conventionnels.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents facteurs de conception des protocoles de routage qui devant être pris en considération ainsi que les métriques de routage. Puis allons présenter une taxonomie des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil où nous allons citer des exemples d'algorithmes pour chaque sous classes.

2.2 Problématique de routage dans les RCSFs

Le routage est la méthode qui consiste à déterminer l'acheminement optimal des données à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance.

La stratégie de routage doit créer des chemins optimaux et pouvoir prendre en compte différentes métriques de coûts (bande passante, nombre de liens, ressources du réseau, etc.). Si la construction des chemins optimaux est un problème dur, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, la stratégie de routage doit assurer une main-

tenance efficace de routes avec le moindre coût possible.

Le problème qui se pose dans le contexte des RCSFs est l'adaptation de l'approche de routage utilisée avec le grand nombre de nœuds existants dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul, des réserves d'énergie et de capacité mémoire limitées. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doit étudier les problèmes importants tels que la tolérance aux fautes, l'utilisation optimale des ressources des nœuds, le passage à l'échelle et l'assurance d'une bonne qualité de service.

2.3 Facteurs de conception de protocoles de routage

L'étude et la mise en œuvre d'algorithmes de routage pour assurer la connexion des RCSFs au sens classique du terme, est un problème complexe. L'environnement est dynamique et évolue donc au cours du temps, la topologie du réseau peut changer fréquemment. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive dépendre des facteurs suivants :

2.3.1 Déploiement des nœuds

Le déploiement des nœuds est une considération importante. Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être installés d'une manière déterministe ou auto-organisée. Si le déploiement du réseau est déterministe, les nœuds sont placés manuellement d'une manière prédéterminée. Le routage pourrait suivre les chemins prédéterminés mais ce n'est pas toujours le cas. Si le déploiement du réseau est auto-organisé, les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller.

2.3.2 Consommation d'énergie

Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries de petite taille, la capacité énergétique d'un nœud capteur est limitée. Cette source d'énergie doit être utilisée de manière rationnelle afin de prolonger la durée de vie du nœud et de garder ainsi intacte la connectivité du RCSF. En effet, chaque unité d'un nœud capteur (acquisition, traitement et communication) consomme de l'énergie, mais à des proportions différentes, guidées en général par la nature du composant et le type de l'application embarquée sur le nœud qui orchestre le fonctionnement de chacun de ces composants.

Puisqu'il affecte directement la consommation d'énergie, le routage reste l'un des principaux défis des concepteurs de protocoles dédiés aux RCSFs. Les sources de consommation d'énergie au niveau de la couche réseau sont diverses :

- La longueur des chemins de routage.
- La qualité des liens.
- Le mode de communication.

- Le routage des paquets inutiles.
- Les critères de choix d'un chemin de routage

2.3.3 Modèle de transmission

Le modèle de renvoi des données perçues constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Le modèle de délivrance des données que ça soit : orienté temps (time-driven), évènementiel (event-driven), orienté requête (query-driven) et hybride sont bien appropriés aux applications critiques en temps.

Une combinaison des modèles précédents est également possible. Le protocole de routage est fortement influencé par les modèles de données rapportées concernant la consommation d'énergie et la stabilité de route [14].

2.3.4 Tolérance aux pannes

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'aptitude du protocole de routage à maintenir ses fonctionnalités, en cas de panne de quelques nœuds. Le but de la tolérance aux pannes est d'éviter la faille totale du système, malgré la présence de fautes dans un sous ensemble de ses composants élémentaires. Les pannes sont tolérées puisqu'elles sont plus fréquentes à cause de l'épuisement rapide d'énergie et à la nature contraignante de l'environnement qui expose les nœuds à des endommagements physiques. Pour cela, les protocoles de routage conçus doivent atteindre le niveau de tolérance aux pannes requis selon l'application. A cet effet, les protocoles de routage doivent, en cas de défaillance de liens de communication, procéder à la formation de nouvelles routes entre les nœuds.

2.3.5 Scalabilité

Le nombre de nœuds capteurs déployés dans une région de capture peut être dans l'ordre des centaines voire des milliers. N'importe quel schéma de routage doit pouvoir travailler avec ce nombre énorme de nœuds et s'adapter et continuer à répondre aux besoins, dans le cas d'ajout de nouveaux nœuds capteurs au réseau. En outre, les protocoles de routage dans un réseau de capteurs doivent être assez scalables pour répondre aux événements dans l'environnement.

2.4 Métriques de routage

Un calcul de métrique est un algorithme qui traite le coût associé à chaque chemin de routage. Les protocoles de routage permettent aux nœuds de comparer les métriques calculées afin de déterminer les routes optimales à emprunter.

Nous définissons dans cette section les métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage. Si la métrique est optimale, le protocole de routage considère que la probabilité que les données arrivent intactes et dans un minimum de temps

au nœud puits, à travers certains nœuds intermédiaires, est grande. Plusieurs métriques peuvent affecter le routage en termes d'énergie, délai, longueur du chemin, etc.

Les métriques de routage peuvent être classées en deux classes : métriques applicables à toutes les architectures des RCSFs et métriques significatives seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie.

2.4.1 Métriques applicables à toutes les architectures des RCSF

1.4.1.1 Le nombre de sauts "Hop-count"

Les protocoles de routage utilisent cette métrique pour minimiser le nombre de sauts pendant le routage [16]. L'idée est de calculer le nombre de nœuds intermédiaires pouvant être traversés lors d'une transmission d'un paquet du nœud source vers le nœud puits. La route choisie est celle qui contient un nombre minimum de sauts.

1.4.1.2 Perte de paquets

Les protocoles de routage utilisent cette métrique dans le but de minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis une source vers une destination pendant le routage [HH06]. L'idée est de calculer le taux de paquets perdus et de paquets émis transitant dans le réseau. Autrement dit, on calcule le nombre de paquets perdus sur le nombre de paquets transmis lors d'une transmission. Dans le cas où le taux de perte de paquets est élevé, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes qui permettent de minimiser cette perte.

1.4.1.3 Le temps de traverser un saut "Per hop round trip time"

Cette métrique mesure le temps d'aller-retour des requêtes envoyées aux nœuds voisins. Elle peut être calculée en ayant un nœud qui va envoyer des paquets de requête avec un estampille (timestamped) à l'un de ses voisins avec un intervalle de temps. Quand le voisin reçoit le paquet, il le transmet de nouveau à l'expéditeur. En comparant l'estampille avec la durée du retour, la qualité du lien peut être évaluée. Naturellement, les résultats de ce test peuvent être altérés par le temps d'attente (queuingdelay) ou la charge sur les deux nœuds [15].

1.4.1.4 Délai de bout-en-bout "EED"

L'EED (End-to-End Delay) est le temps moyen nécessaire pour qu'un paquet de données soit acheminé à partir de la source vers la destination [16]. Cette technique est parmi les métriques les plus connues dans les réseaux sans fil. Les protocoles de routage l'utilisent pour minimiser le temps de propagation des paquets de données échangés pendant le routage.

2.4.2 Métriques significatives seulement pour les environnements soumis à des contraintes d'énergie

Les protocoles de routage utilisent cet ensemble de métriques pour minimiser la consommation d'énergie pendant le routage [17]. L'idée est de calculer l'énergie disponible(ED) pour chaque nœud du réseau et l'énergie nécessaire (EN) pour les transmissions des paquets entre une paire de nœuds. Les routes entre les nœuds et le puits sont établies et chacune d'elles est caractérisée par la somme des ED des nœuds qui la constituent et par la somme des EN des liaisons qui la construisent. La consommation d'énergie suit plusieurs approches:

1.4.2.1 La notion de coût "CostAwareness"

Costawareness représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie dans le routage dans laquelle la durée de vie d'un nœud doit être prolongée au maximum. Les choix des opérations de routage que le nœud fera sont une fonction relative à son énergie de batterie restante. Afin d'utiliser "costawareness" en tant que métrique, on doit calculer la quantité d'énergie consommée pour chaque route imposée au réseau. Plus la consommation d'énergie est minime plus les tâches de routage peuvent être accomplies par le réseau/nœud avant qu'il soit défaillant [18]. Autrement dit, la route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme des énergies nécessaires EN.

1.4.2.2 La notion de puissance "Power Awareness"

PowerAwareness représente une technique pour minimiser la consommation d'énergie. Elle essaye de réduire au maximum l'énergie totale dépensée lors de l'envoi d'un message depuis sa source à sa destination [18]. Afin d'utiliser "power awareness" en tant que métrique, on doit attribuer un poids, basé sur la distance, sur chaque saut possible entre les nœuds du réseau. La route choisie est celle caractérisée par la somme des énergies disponibles ED la plus élevée.

1.4.2.3 La notion de coût-puissance

Cette métrique est la combinaison des deux métriques précédentes. Elle vise à réduire au maximum l'énergie consommée dans tout le réseau et en même temps elle évite qu'un nœud ait une quantité d'énergie limitée [18]. La route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme des énergies nécessaires EN et la plus grande somme des énergies disponibles ED.

1.4.2.4 Le temps du premier nœud à mourir

Cette métrique détermine le temps auquel le premier nœud épuise complètement son énergie[19]. Elle n'est pas concernée par la défaillance d'un nœud dû à des raisons techniques.

1.4.2.5 Le temps du dernier nœud à mourir

C'est l'opposé exact de la métrique précédente. Elle enregistre le temps où le dernier nœud du réseau a consommé toute son énergie [19]. En d'autres termes, cette métrique mesure la durée de vie du réseau.

2.5 Les approches de routage dans les RCSFs

Dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds sont déployés d'une manière dense dans un champ de captage. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi-sauts sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient[20].

En générale ces protocoles sont classifiés selon la figure ci-dessous. Ces protocoles sont répartis dans quatre grandes classes[21]. Classification selon la structure du réseau, Classification selon l'établissement de routes, Classification selon l'initiateur de communication et la Classification selon la fonction du protocole. Nous détaillons par la suite chaque classe en citant des exemples.

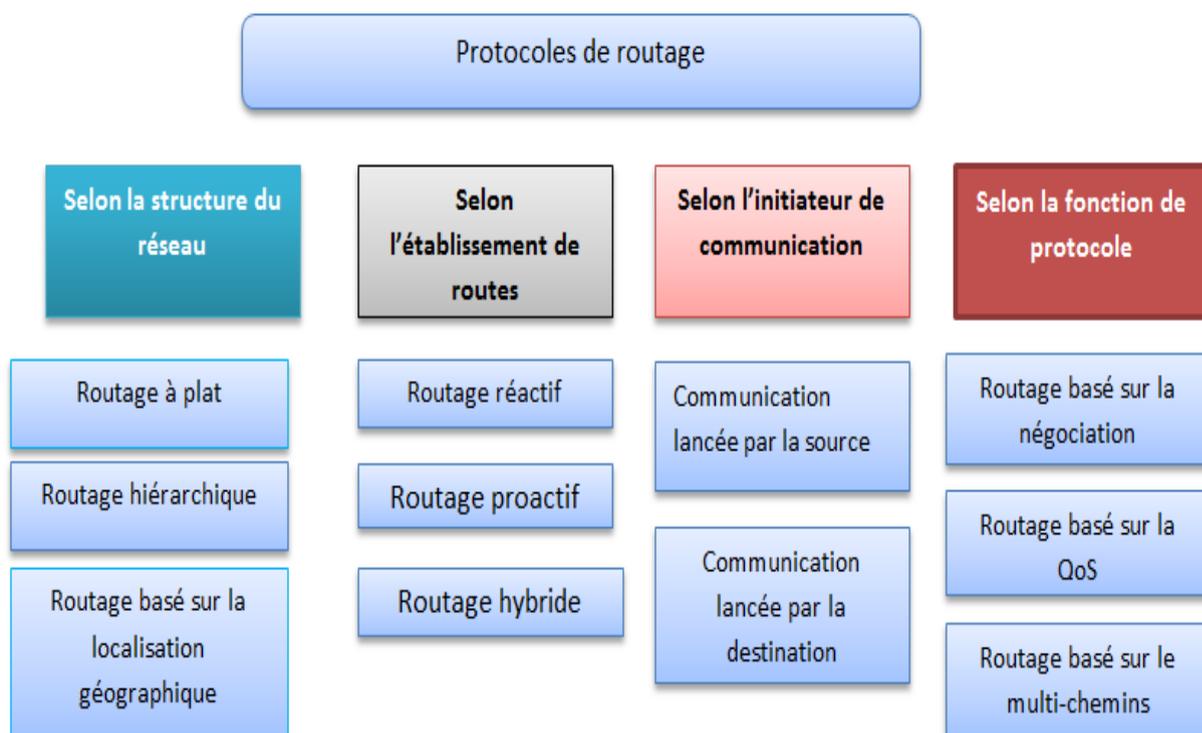


Figure 2.1: Taxonomie de protocoles de routage dans les RCSF.

2.5.1 Classification Selon la structure du réseau

La structure ou la topologie du réseau détermine l'organisation logique adaptée par les protocoles de routage afin d'exécuter les différentes opérations de découverte de routes et de transmission de données. Elle joue un rôle significatif dans le fonctionnement d'un protocole. Cette classe comprend trois sous classes ; la première est formée de protocoles considérant un réseau plat, la deuxième englobe les protocoles hiérarchiques quant à la dernière classe regroupe les protocoles géographiques

2.5.1.1 Routage à plat

Dans le routage plat, chaque nœud joue typiquement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent pour accomplir la tâche globale du réseau. En raison du nombre important des nœuds capteurs, il n'est pas faisable d'assigner un identifiant global pour chaque nœud. Cette considération a mené au routage centré-données, où la station de base envoie des requêtes à certaines régions du réseau et attend des retours de données à partir des nœuds capteurs situés dans ces régions. Puisque des données sont demandées par le biais des requêtes, la désignation des attributs est nécessaire pour indiquer les propriétés de ces données. Des premiers travaux sur le routage centré-données, tels que les protocoles SPIN [22] et la diffusion dirigée [23], ont enregistré une économie d'énergie grâce à la négociation entre les nœuds du réseau et l'élimination des données redondantes.

2.5.1.2 Routage hiérarchique

Les topologies hiérarchiques ont été introduites en divisant les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité. C'est une technique bien connue avec des fonctionnalités qui résolvent les problèmes liés à la surcharge de la station de base due à la densité du réseau et qui augmentent l'efficacité de la communication en impliquant les nœuds dans une communication multi-sauts au sein d'un seul groupe.

L'une des méthodes les plus employées est le clustering, où le réseau est partitionné en groupes appelés "clusters". Un cluster est constitué d'un chef (cluster-head) et de ses membres. Les méthodes de routage hiérarchique ont des avantages spéciaux liés au passage à l'échelle et à l'efficacité dans la communication. Par exemple, elles sont utilisées pour exécuter un routage avec économie d'énergie dans les RCSFs. Dans une architecture hiérarchique, des nœuds à grande énergie peuvent être employés pour traiter et envoyer l'information, alors que des nœuds à énergie réduite peuvent assurer la capture à proximité de la cible. La création des clusters et l'assignation des tâches spéciales aux têtes de clusters peuvent considérablement renforcer le passage à l'échelle, l'augmentation de la durée de vie et l'efficacité énergétique du système global [24]. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [25] est un exemple de protocole de routage hiérarchique.

2.5.1.3 Routage basé sur la localisation géographique

Cette classe englobe les protocoles géographiques [KMo 05] qui utilisent les informations d'emplacement pour guider la découverte de routage et la transmission des données. Ils permettent la transmission directionnelle de l'information en évitant l'inondation d'information dans l'ensemble du réseau. Par conséquent, le coût de contrôle de l'algorithme est réduit et le routage est optimisé. De plus, avec la topologie réseau basée sur des informations de localisation des nœuds, la gestion du réseau devient simple. L'inconvénient de ces protocoles de routage est que chaque nœud doit connaître les emplacements des autres nœuds.

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) [25] est un protocole de localisation qui forme une grille virtuelle à travers la zone de capture, où chaque nœud utilise le service GPS pour pouvoir se positionner, et s'associer à un point particulier de la grille construite. Ces classes avec un ensemble de protocoles représentatifs existants sont données dans la figure ci-après.

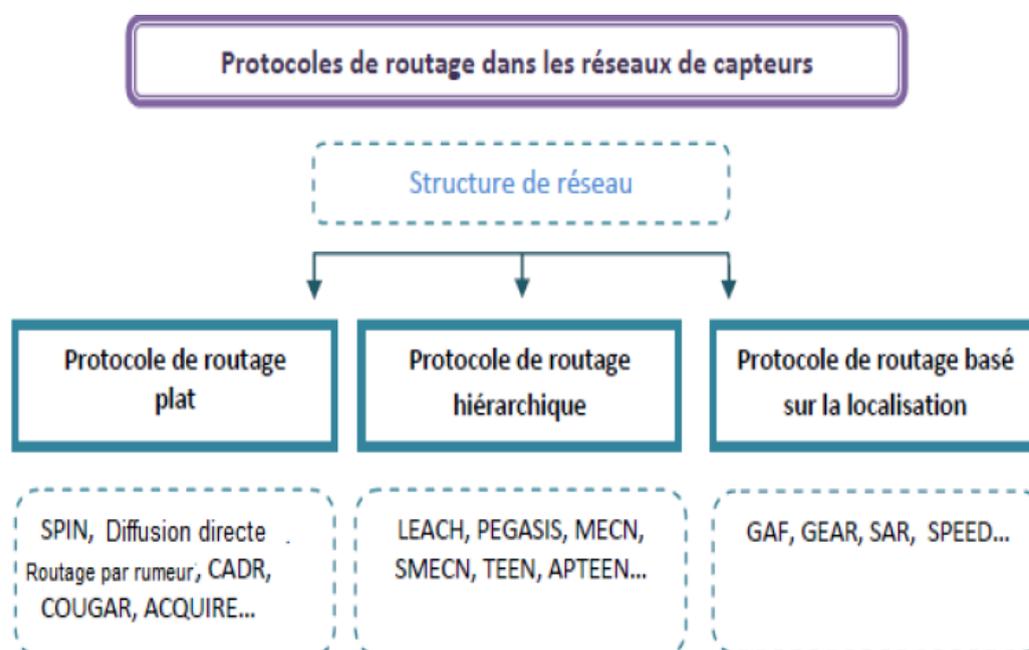


Figure 2.2: Résumé des principaux algorithmes de routage selon la topologie du réseau.

2.5.2 Classification Selon l'établissement de routes

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

2.5.2.1 Routage proactif

Les routes dans ce type de routage sont calculées à l'avance. Chaque nœud met à jour plusieurs tables de routage par échange de paquets de contrôle entre voisins. En effet, si un nœud veut communiquer avec un autre, il a la possibilité de consulter localement la table de routage et de créer le chemin dont il a besoin. Le besoin de conserver et de contrôler la validité des tables de routages en permanence (comprenant en outre des informations qui ne seront sans doute pas utilisées) est le principal inconvénient des protocoles proactifs. Par contre, ils présentent l'important avantage de ne nécessiter aucun délai avant de transmettre un paquet puisque la route est déjà connue. OLSR [26] et FSR [27] sont deux exemples de protocoles proactifs.

2.5.2.2 Routage réactif

Contrairement aux protocoles proactifs, les protocoles réactifs ne calculent la route que sur demande. Si un nœud source a besoin d'envoyer un message à un nœud destination, alors il envoie une requête à tous les membres de réseau. Après la réception de la requête, le nœud destination envoie un message réponse qui remonte vers la source (méthode Backward Learning [6]). Cependant, le routage à la demande génère une lenteur à cause de la recherche des routes. Cela peut entraîner une dégradation des performances des applications. Ce type de protocole présente l'inconvénient d'être très coûteux en transmission de paquets lors de la détermination des routes mais a l'avantage de ne pas avoir à maintenir des informations inutilisées dans les tables de routage. AODV [28] et DSR [29] sont deux exemples de protocoles réactifs.

2.5.2.3 Routage hybride

Les protocoles de routages hybrides ou "mixtes" combinent les deux types de routages précédents (proactif et réactif). Le protocole proactif est appliqué dans un périmètre réduit autour de la source (nombre limité de voisins), tandis que le protocole réactif est appliqué au delà de ce périmètre (les voisins lointains). Cette combinaison est réalisée dans le but d'exploiter les avantages de chaque méthode et de contourner leurs limitations. ZRP [30] et CBRP [31], sont deux exemples de protocoles hybrides.

2.5.3 Classification Selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être lancée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

2.5.3.1 Communication lancée par la source

Dans les protocoles de communication lancée par la source, les nœuds envoient des données à la destination dès qu'ils les ont capturées. Ces protocoles utilisent les données

rapportées avec time-driven ou avec event-driven. Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds captent certains événements[32]. Cette approche d'établissement de la communication dans le réseau évite le problème d'overhead ; et permet l'efficacité énergétique due à l'absence des requêtes qui consomment beaucoup d'énergie générées par le nœud puits. Par contre les capteurs doivent avoir des informations sur les chemins qui conduisent au nœud puits. Pour cette approche, l'énergie n'est pas la seule préoccupation, des exigences de QoS doivent en général être respectées (latence, fiabilité).

2.5.3.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles de communication lancée par la destination utilisent les données rapportées avec un modèle à base orienté requête, et dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination (station de base) ou par un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région [33]. L'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puits élimine les transmissions inutiles.

Cependant, cette classe de protocoles présentent des inconvénients notamment : les délais entraînés par l'établissement des routes sont longs et la circulation de messages requêtes de grande taille tend à épuiser les batteries des capteurs.

2.5.4 Classification Selon la fonction du protocole

Cette classe peut-être décomposée en trois sous-classes, ceci en fonction de la stratégie de routage utilisée par le protocole. Cette stratégie peut être basée à la fois sur le multi-chemins, la négociation ou encore la qualité de service.

2.5.4.1 Routage basé sur la négociation

d'empêcher l'envoi de données redondantes au prochain capteur ou à la station de base. En effet, avant que la vraie transmission de données ne commence, les capteurs conduisent une série de messages de négociation nommés " descripteurs de données de haut niveau ". Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises ; ainsi que la négociation entre les nœuds leur permet de prendre des décisions adéquates suivant leurs ressources énergétiques disponibles.

Par ailleurs l'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie ; ainsi que le scénario de négociation entre les nœuds (déterminer les données et les acheminer) produit un délai pour délivrer les données aux nœuds puits. Le protocole SPIN [22] est un exemple de cette catégorie.

2.5.4.2 Routage basé sur la QoS

Dans le domaine des réseaux, la notion de qualité de services est évoquée pour désigner la capacité du réseau à fournir un service. Du fait de la mobilité (défaillance) des nœuds responsables de la transmission des données entre source et destination, les risques que la route se coupe avant la fin de la communication sont très importants.

Le principe des protocoles de routage avec QoS se base sur le fait que le réseau doit être capable de satisfaire certaines métriques (latence, énergie des nœuds, bande passante, etc.) tout en acheminant le maximum de données vers la station de base. La prise en compte des délais de transmissions rend les protocoles de cette approche très recommandés pour des applications de surveillance (centres nucléaires, monitoring médical, applications militaires, etc) ainsi que la qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions et augmente le taux d'arrivée des paquets au nœud puits. Par ailleurs, l'amélioration de la QoS se fait automatiquement au détriment de la consommation de l'énergie par le capteur.

Le protocole de routage doit donc assurer les fonctions de routage et de QoS sans avoir à surcharger le réseau avec un protocole dédié à la QoS. Il existe plusieurs protocoles de ce type dans la littérature ; SAR est l'un des tous premiers protocoles ayant introduit la QoS dans ses décisions de routage [34]. SPEED est un autre protocole de routage avec QoS pour les RCSFs qui fournit des garanties temps-réel de bout-en-bout [35].

2.5.4.3 Routage basé sur le multi-chemins

Les protocoles de cette sous-classe utilisent des chemins multiples pour router les données au lieu d'un chemin unique entre une source et une destination. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la vraisemblance qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination lorsque le chemin principal échoue. Cette tolérance peut être renforcée en découvrant des chemins multiples entre la source et la destination au prix d'une consommation énergétique et d'un trafic de contrôle supplémentaire. Ces chemins alternatifs sont maintenus en veille par la source en envoyant des messages périodiques. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée tout en ayant une surcharge de contrôle supplémentaire pour garantir la validité des chemins alternatifs.

Plusieurs solutions de routage pour les réseaux de capteurs sans fil utilisent le paradigme du multi-chemins tel qu'AOMDV [36]. Cette approche offre un mécanisme d'équilibrage de charge pour la répartition du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des nœuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens ainsi pour augmenter de la fiabilité et la robustesse du réseau par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination. L'inconvénient de ce concept de routage est que les chemins alternatifs sont maintenus en vie par l'envoi de messages périodiques. Par conséquent, un overhead et une perte additionnelle d'énergie viennent s'ajouter pour maintenir ces chemins alternatifs.

2.6 Le paradigme multi-chemins dans les RCSFs

2.6.1 Principes de base dans la désignation des chemins multiples

Bien que l'approche routage multi-chemins a été utilisée à des fins différentes, l'atteinte de gain de performance est affectée par la capacité du protocole de construire un nombre de chemins adéquat de grande qualité. Chaque protocole de routage multi-chemins comprend plusieurs composantes afin de construire des chemins multiples et de distribuer le trafic réseau sur les chemins découverts [37]. Néanmoins, ces derniers peuvent être utilisés simultanément pour fournir des ressources adéquates dans les conditions réseau intensive ou alternativement où chaque nœud source peut utiliser qu'un seul chemin pour la transmission des données et passer à un autre chemin lors des défaillances de nœuds ou de liens. Ce dernier est celui principalement utilisé pour la tolérance aux pannes.

- **Découverte de routes:** la tâche principale du processus de découverte de route est de déterminer un ensemble de nœuds intermédiaires qui doivent être sélectionnés pour construire plusieurs chemins du nœud source vers le nœud récepteur. Les chemins découverts peuvent être généralement classés comme : nœuds-disjoints, liens-disjoints, ou encore partiellement disjoints selon que les chemins soient utilisés. En outre, deux chemins sont dits liens-disjoints s'ils ne partagent pas de liens communs, et ils sont nœuds-disjoints s'ils n'ont aucun nœud en commun (sauf, bien sûr, les nœuds source et destination). Les chemins partiellement disjoints sont des chemins qui partagent quelques nœuds et/ou liens.

En ce qui concerne les avantages et les inconvénients des différents types de chemins, la densité du réseau et des exigences de performance de l'application sous-jacente joue un rôle important pour prendre la meilleure décision entre l'utilisation de chemins nœuds-disjoints, liens-disjoints, ou partiellement disjoints

- **Sélection du chemin et la distribution du trafic:** Après la construction des chemins multiples, une autre question importante qui devrait être abordée : la sélection d'un nombre suffisant de routes pour la transmission de données. Selon l'intention l'objectif principale de la conception de chaque protocole de routage, multi-chemins un certain nombre de chemins d'accès doivent être sélectionnés pour répondre aux exigences de performance de l'application considérée prévue. Par conséquent, en proposant un mécanisme de sélection de chemin parfait pour choisir un nombre suffisant de chemins est la partie la plus importante de la conception du routage d'une haute performance.

Un protocole peut décider de n'utiliser que le meilleur chemin pour la transmission de données et de garder les chemins supplémentaires comme chemins de sauvegarde pour des fins de tolérance aux pannes. En revanche, un autre protocole de routage multi-chemins peut utiliser plusieurs chemins en même temps afin de fournir une transmission fiable des données ou la distribution du trafic. Pourtant, le nombre

de chemins sélectionnés joue un rôle crucial pour améliorer les paramètres de performances. En fait, en raison de l'interférence sans fil entre les nœuds voisins, en utilisant tous les chemins construits dans un seul canal réseaux sans fil ne donne pas nécessairement une plus grande capacité de transmission de données.

- **Défaillance d'un nœud ou d'un lien:** la défaillance d'un nœud ou l'échec d'un lien dans un ensemble de chemins nœuds-disjoints affecte uniquement le chemin d'accès qui contient le lien ou le nœud défaillant. Puisque ce type de chemin fournit des ressources réseau plus agrégées, les chemins nœud-disjoints sont plus préférés que les chemins liens-disjoints et les chemins partiellement disjoints.

Toujours à cause du déploiement aléatoire des nœuds capteurs, il est difficile de découvrir un grand nombre de chemins nœuds-disjoints entre le nœud source et le nœud destination. En revanche, les chemins liens-disjoints peuvent contenir plusieurs nœuds communs alors qu'il n'y a aucun lien partagé entre les chemins. En conséquence, toute défaillance d'un nœud dans un ensemble de chemins liens-disjoints peut désactiver plusieurs chemins qui partagent le nœud défaillant. Enfin, les chemins partiellement disjoints peuvent comprendre de multiples chemins, qui peuvent prendre parts dans plusieurs liens ou nœuds entre des chemins différents. En comparaison avec les types de chemins, tout lien ou défaillance d'un lien ou d'un nœud dans un ensemble de chemins partiellement disjoints peut affecter plusieurs chemins.

- **Maintenance de chemin:** En raison des ressources contraintes des nœuds capteurs et une dynamique élevée, de faible puissance des liaisons sans fil, les chemins sont très sujets aux erreurs. Par conséquent, la reconstitution de chemin devrait être fournie pour réduire la dégradation des performances, telle est la tâche principale de la phase de maintenance de chemin dans les protocoles de routage multi-chemins.

Le processus de redécouverte de chemin peut être lancé dans trois situations différentes: (1) quand un chemin actif a échoué, (2) lorsque toutes les routes actives ont échoué ou, (3) quand un certain nombre de chemins actifs ont échoué. Comme la fréquence de l'initiation du processus de redécouverte de route dans la première approche est plus élevée que pour les deux autres approches, en utilisant cette stratégie ceci impose un surcoût élevé. Néanmoins, effectuer un processus de redécouverte de route après l'échec de tous les chemins actifs peut réduire de manière significative les performances du réseau. Par conséquent, il semble que la troisième approche peut représenter un compromis entre les avantages et les inconvénients des deux premières.

2.6.2 Routage multi-chemins avec QoS dans les RCSFs

Dans la plupart des cas, les réseaux de capteurs sans fil sont à sauts multiples. Ainsi, offrir de la QoS dans la seule couche liaison de données est insuffisant. Des mécanismes de QoS doivent être inclus dans la couche réseau pour avoir des garanties de bout en bout.

Le support de la QoS en termes de débit de bout en bout, de latence et de taux de livraison des données est un objectif important dans la conception de protocoles de routage multi-chemins pour différents types de réseaux. Des chemins découverts avec des caractéristiques différentes peuvent être utilisés pour distribuer le trafic réseau en fonction de la qualité de service exigée de l'application pour laquelle le protocole de routage multi-chemins a été conçu. Par exemple, les paquets de données temps réel peuvent être transmis par des chemins de plus grande capacité avec délai minimum et tout paquet de données non critiques peut être transmis par le chemin non-optimal avec plus de délai de bout en bout.

En outre, contrairement aux techniques de routage à chemin unique la méthode de routage multi-chemins peut conserver les exigences de qualité de service de l'application envisagée dans le cas de d'échecs en dirigeant le trafic réseau vers un autre chemin actif. Si l'idée clé est d'améliorer les exigences de performance tels que le débit, le taux de livraison des données, le délai et la durée de vie, un mécanisme efficace de distribution de charge peut être utilisé pour distribuer le trafic réseau global sur les chemins construits [59]. En outre, afin d'améliorer l'utilisation des ressources individuelles sur les chemins, le taux de trafic injecté sur chaque chemin doit être calculé en fonction de la capacité du chemin.

2.7 Conclusion

Les avancées récentes dans les réseaux de capteurs sans fil ont mené à des nouveaux protocoles conçus spécifiquement pour ce type de réseaux notamment les protocoles de routage. Ce dernier est influencée par plusieurs facteurs qui doivent être dépassés pour atteindre une communication efficace. Ainsi est mesurée par les métriques, et qui sont valables pour toutes les approches proposées pour résoudre le problème de routage dans les RCSF.

Dans ce chapitre, nous avons cité les principales approches proposées pour résoudre le problème de routage dans des RCSFs. Ces approches ont été classifiées selon plusieurs critères et principalement : selon la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement de route et l'initiateur de communication. Parmi ces catégories, nous distinguons les protocoles multi-chemins qui sont particulièrement intéressants pour les RCSFs. En effet, ils constituent un standard sur lequel est basée la conception de plusieurs protocoles de routage que nous allons présenter dans le prochain chapitre.

3

Les protocoles de routage multi-chemins dans les RCSFs

3.1 Introduction

En raison de la capacité limitée des chemins multi-sauts [6] et de la forte dynamique des liaisons sans fil, l'approche de routage simple à chemin unique ne parvient pas à assurer de manière efficace la transmission de données à haut débit dans les réseaux de capteurs sans fil. De nos jours, l'approche de routage multi-chemins est largement utilisée en tant que l'une des solutions possibles pour faire face à cette limitation et une panoplie de protocoles de routage multi-chemins a été élaborée.

Ce présent chapitre, présente un état de l'art des principales solutions de routage multi-chemins dans les RCSFs suivies d'une comparaison en termes des métriques de qualité de service, qui nous permettra d'énumérer les avantages et les inconvénients de chacun d'eux.

3.2 Le routage multi-chemins dans les RCSFs

3.2.1 Motivations

Bien que le maintien de plusieurs chemins vient souvent au prix d'un sur débit de routage supplémentaire, le routage multi-chemins présente plusieurs avantages[37,39,41]. Par exemple, le maintien de chemins alternatifs peut être exploité pour diminuer le débit de routage et le délai bout-en-bout des communications dans les protocoles de routage réactifs, et qui sont dues aux reconstructions fréquentes de chemins. De plus, l'utilisation parallèle de plusieurs chemins pour transmettre les données présente des avantages de

fiabilité des transmissions et d'équilibrage de la charge dans le réseau [38]. En effet le routage multi-chemins est capable de fournir:

- Un équilibrage de charge: utiliser plusieurs chemins peut aider à éviter la congestion et les goulots d'étranglements,
- Une fiabilité et une tolérance aux fautes: Le routage à travers les multiples chemins simultanés peut améliorer la fiabilité en envoyant les copies multiples des données à travers les différents chemins,
- Une agrégation de la bande passante: l'utilisation de la bande passante de toutes les routes simultanément peut répondre aux besoins de l'application,
- Un délai réduit: le délai peut être réduit en divisant le message en segments qui seront envoyés à travers les différentes routes simultanément.

3.3 Critères de comparaison

Afin de pouvoir comparer les différents protocoles, il faut prendre en compte différents critères [Corson 99] tels que:

- Des propriétés qualitatives comme l'absence de boucles ("loop free"), l'adaptation de l'algorithme de routage au trafic, la mise en veille des nœuds,
- Des métriques quantitatives telles que le délai de bout en bout, la bande passante, le temps de découverte des routes,
- Des indicateurs de la performance du routage comme le rapport entre le nombre de bits de contrôle et le nombre de bits de données par exemple,
- Le contexte du réseau comme le nombre de nœuds, leur mobilité, l'évolution de la topologie du réseau.

Cette multiplicité des critères ne rend pas la tâche facile et peut entraîner une certaine subjectivité des résultats des comparatifs. Néanmoins, il existe différents travaux dans la littérature essayant de comparer les protocoles de routage [42,43,44]. Dans notre comparaison, nous allons nous focaliser sur les critères quantitatifs de QoS.

3.4 Etude comparative des protocoles de routage multi-chemins

De nombreux protocoles de routage multi-chemins ont été proposés dans la littérature. En général, ils essaient d'établir des routes aussi disjointes que possible et diffèrent selon leurs critères de sélection de route [39].

3.4.1 E2AOMDV: Energy Efficient Ad Hoc On Demand Multipath Distance Vector Routing Protocol

3.4.1.1 Description

E2AOMDV [45] a été conçu pour atteindre l'efficacité énergétique des communications à faible latence. Il représente une version modifiée du protocole AOMDV [36] par l'inclusion d'un mécanisme de sélection consciente d'énergie EA (Energie Aware) basé sur l'estimation de l'énergie nodale maximale pour améliorer les performances énergétiques dans les réseaux ad hoc. Alors que AOMDV tente de découvrir tous les chemins liens-disjoints possibles entre chaque paire de nœuds source-puits, le protocole E2AOMDV choisit quelques meilleurs chemins (chemins optimaux) parmi ceux disponibles à partir de la technique de sélection consciente d'énergie et d'équilibrer la consommation d'énergie nodale pour empêcher un ou plusieurs nœuds critiques d'épuiser leur énergie. Cependant la source suppose l'énergie initiale du nœud en tant que son énergie surplus. Au niveau des nœuds intermédiaires le mécanisme de sélection est appliqué.

La procédure de découverte de routes d'AOMDV est modifiée pour permettre la sélection des meilleurs chemins et pour le calcul de l'énergie surplus nodale maximale.

3.4.1.2 Fonctionnement

1. Mécanisme de sélection conscient de l'énergie: Chaque nœud calcule son propre statut énergétique et déclare un état approprié. Le choix de l'état est basé sur la capacité de la batterie et la durée de vie prévue d'un nœud. L'heuristique utilisée pour associer un état ('Discard', 'Moderate', 'High') à une paire (battery capacity, lifetime). Le mécanisme permet d'obtenir un meilleur équilibrage de charge.
2. Trouver l'énergie surplus nodale maximale des meilleures routes: Quand un nœud intermédiaire reçoit un message RREQ, il vérifie si le numéro de séquence du message RREQ est plus grand que son numéro de séquence, il compare l'énergie surplus dans le message RREQ et son énergie surplus. Au cas où son énergie surplus serait plus grande que celle spécifique dans le message RREQ, la variable d'énergie surplus dans le message de RREQ est mise à jour avec sa propre énergie surplus. Par cette méthode nous pouvons réaliser la valeur de l'énergie surplus maximale parmi tous les nœuds dans le chemin spécifique. Les chemins allons vers sont installés comme dans AOMDV.
3. Trier Les multiples chemins dans un ordre décroissant selon l'énergie surplus nodale: Les chemins dans la liste sont triés par la valeur descendante de l'énergie surplus, le chemin avec le maximum d'énergie surplus est choisi pour expédier les paquets de données.
4. Envoyer les paquets de données à travers le chemin avec l'énergie surplus nodale

maximale : Une fois que le nœud source reçoit le message RREP contenant le nouveau chemin avec l'énergie surplus maximum, il expédie les paquets de données par ce chemin.

3.4.1.3 Discussion

- Il assure une gestion équilibrée de l'énergie;
- Il ne considère pas la fiabilité ni le temps réel;
- Il ne considère pas les limitations des RCSFs tels que la mémoire.

3.4.2 EQSR: Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks

3.4.2.1 Description

EQSR [46] est l'un des récents protocoles proposés, conçu pour satisfaire la fiabilité, basé sur une variation de la diffusion dirigée et maximise la durée de vie du réseau à travers:

- Une consommation d'énergie équilibrée entre les nœuds du réseau;
- Utilisation de la technique de différenciation de services à travers l'emploi d'un modèle de file d'attente pour gérer le trafic en temps réel c'est à dire permettre au trafic contraint par le temps d'arriver à la destination dans un délai acceptable;
- Réduction du délai de bout en bout en routant à travers de multiples chemins;
- Augmente les performances du réseau en introduisant la redondance de données;
- EQSR Considère l'énergie résiduelle, la taille du buffer disponible dans un nœud et le SNR (Signal to Noise Ratio) pour choisir le prochain saut dans la phase de construction de routes, en employant la fonction coût du lien suivante:

$$\text{Next hop} = \max_{y \in N_x} \{ \alpha E_{resd,y} + \beta B_{buffer,y} + \gamma I_{interferencexy} \}$$

Avec N_x : l'ensemble des voisins du nœud x. α, β, γ : Les poids appropriés aux facteurs suivants:

- $E_{resd,y}$: L'énergie résiduelle du nœud y;
- $B_{buffer,y}$: La taille du buffer disponible du nœud y;
- $I_{interferencexy}$: Le SNR du lien entre x et y.

Le coût total pour un chemin composé d'un ensemble de K nœuds est la somme des coûts des liens individuels:

$$l(xy)_{i,i \in k} : C_{total,p} = \sum_{i=1}^{k-1} l(xy)_i$$

3.4.2.2 Fonctionnement

1. Phase de découverte de routes: Basée sur l'idée de la diffusion dirigée, le sink commence la phase de découverte de routes en créant un ensemble de voisins capables de transmettre les données vers le sink à partir d'un nœud source. Les routes sélectionnées sont disjointes. Cette phase est initialisée par un échange de messages Hello entre les voisins, ces messages contiennent : la qualité du lien (SNR), hop count et l'énergie résiduelle. Chaque nœud met à jour sa table de voisinage avec ces informations. Tous les nœuds peuvent calculer la fonction coût de leurs voisins. Le nœud sink calcule localement son meilleur prochain saut et envoie un RREQ vers ce nœud qui calculera son meilleur prochain saut et ainsi de suite jusqu'à arriver à la source. Ceci pour établir la route primaire et pour les routes alternatives les nœuds exécutent la même procédure en choisissant le second meilleur prochain saut.
2. Rafraîchissement de routes: Pour économiser l'énergie, en réduisant les messages de contrôle, les métriques sont incluses dans les messages de données au lieu d'inonder le réseau avec des messages Keepalive pour maintenir les chemins et mettre à jour les métriques de la fonction coût.
3. Sélection des routes: après la découverte des routes vient la sélection d'un ensemble de N routes disponibles pour le transfert de données de la source à la destination avec une borne de livraison. Pour trouver le nombre de routes requises, chaque route est considérée associée avec un taux qui correspond à la probabilité de succès de livraison d'un message à la destination. Le nombre de routes requises est calculées par:

$$K = x_{\alpha} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} p_i(1 - p_i) + \sum_{i=1}^{i=N} p_i}$$

Après le calcul des K routes requises, le protocole calcule l routes pour le trafic temps réel et m routes pour le trafic non temps réel, avec : $K=l+m$. T_r : est la taille du trafic temps réel et T_{nr} : est la taille du trafic non temps réel :

$$l = \frac{T_r}{T_r + T_{nr}} k$$

$$m = \frac{T_{nr}}{T_r + T_{nr}} k$$

Pour le trafic temps réel, EQSR choisit les l meilleurs routes qui minimisent le délai de bout en bout pour assurer la livraison des données à la destination dans le délai requis. Chaque nœud estime le temps que prend un RREQ du sink à la source, en accumulant ce temps le nœud source peut calculer les délais de bout en bout des routes disponibles.

4. Allocation du trafic et transmission de données: EQSR emploie deux files d'attente pour séparer le trafic temps réel (priorité) et non temps réel (FIFO). Chaque nœud source connaît le degré d'importance de chaque paquet avec un niveau de priorité

prédéfini, ainsi la couche application ajoute un bit d'information au paquet pour différencier entre les deux classes de trafic et le classificateur dirige le paquet vers la file appropriée.

Le schéma d'allocation de trafic découpe le paquet en segments égaux et ajoute un code de correction d'erreur pour assurer la fiabilité de la transmission et augmenter la résilience des échecs de routes. Ensuite il ordonnance les sous paquets simultanément pour la transmission à travers les routes valables. Les parties sont collectées et rassemblées au niveau du sink et le message original est reconstruit.

5. Transfert des données à travers les multiples routes: Le transfert de données est réalisé en deux étapes:

- Segmentation et codage de données: un paquet est divisé en segments de tailles égales (l bits) et M+1 parties (FEC) du code correcteur d'erreur sont ajoutées au message original, un champ off permet de séquencer les segments pour la reconstitution du message. Les codes correcteurs sont calculés par un algorithme de codage basé sur l'opérateur XOR, cet algorithme ne requiert pas une haute puissance de calcul ni beaucoup d'espace de stockage.
- Expédition et reconstitution de données: Après la sélection de routes , la segmentation du paquet et l'ajout des codes FEC, un mécanisme d'allocation pour distribuer le trafic à travers les routes sélectionnées selon le délai de bout en bout estimé lors de la construction des routes est exécuté, plus de segments de données sont alloués aux routes avec le plus petit délai.

Au niveau du sink le message original peut être reconstruit en utilisant une transformation linéaire appropriée de XOR. Une partie de l'information codée représente les valeurs des métriques actuelles de la fonction coût, comme ça chaque nœud met à jour sa table de voisins avec ces informations récentes. Un identificateur unique est attribué à chaque message fragmenté utilisé pour rassembler le message sans mélanger les segments des différents messages et un autre champ pour marquer la fin d'un message mis à zéro.

3.4.2.3 Discussion

- Assure la fiabilité et le délai;
- Des frais généraux induits par les files d'attente et le codage;
- Le trafic temps réel T_r est servi au détriment des paquets non temps réel NTR.

3.4.3 Improving Lifetime and Reliability in Routing Real-Time Wireless Sensor Networks based on Hybrid Algorithm

3.4.3.1 Description

Improving Lifetime and Reliability in Routing Real-Time Wireless Sensor Networks based on Hybrid Algorithm [47] est une solution de routage hybride pour augmenter la fiabilité et la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil .C'est une combinaison entre une solution basée sur l'algorithmique génétique et celle pour sauvegarder les routes pour permettre plus de fiabilité.Ce protocole se base sur les hypothèses suivantes:

- Tous les nœuds sont statiques possédant chacun un ID unique;
- Chaque chromosome consiste en des gènes et représente une route de la source vers la destination;
- Les caractéristiques considérées d'un nœud sont la fiabilité (la fiabilité de chaque lien) et l'énergie (dépend de la distance entre les nœuds);
- Des poids sont assignés à chaque service (énergie et fiabilité).

3.4.3.2 Fonctionnement

L'algorithme génétique maintient une population générée aléatoirement et sur laquelle il emploie les opérateurs génétiques (crossover et la mutation) pour générer de nouvelle génération selon une fonction fitness:

$$\text{Fitness}(S) = W_{EC} \times \text{Energyconsumption} + W_{Rel} \times \text{Reliability}(S)$$

Avec W_{EC} : le poids assigné au service consommation d'énergie; W_{Rel} : le poids assigné au service de fiabilité; Energyconsumption: la valeur de l'énergie consommée qui est la même pour toutes les transmissions; Reliability: La fiabilité qui est la probabilité de succès de transmission de paquet à travers une route donnée par:

$$\text{Reliability} = \prod_{i=0}^N (1 - Rel_i).$$

Les routes optimales sont sauvegardées pour une éventuelle demande de route ce qui réduit la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau. De plus lorsqu'il y a échec de l'une de ces routes, et le paquet de données est perdu il est récupéré à partir des buffers des nœuds intermédiaires qui sauvegarde le paquet. Ceci évite une réémission du paquet par la source.

3.4.3.3 Discussion

- Garantie la fiabilité;
- Prolonge la durée de vie du réseau;

- Ne considère pas le délai;
- Basée sur l'algorithmique génétique qui n'est pas adapté aux capacités limités des RCSF;
- Ne considère pas les limites du buffer (sauvegarde des routes).

3.4.4 QEMPAR: QoS and Energy Aware Multi-Path Routing Algorithm for Real-Time Applications in Wireless Sensor Networks

3.4.4.1 Description

QEMPAR [48] a été conçu pour les applications temps réel. Il emploie des critères multiples pour la découverte de routes: énergie résiduelle, probabilité de l'envoi de paquet, la moyenne de probabilité de réception de paquet et l'interférence.

QEMPAR Crée des routes disjointes pour permettre l'utilisation des ressources les plus disponibles et permettre plus de tolérance aux fautes. Il se base sur les hypothèses suivantes:

- Les nœuds sont déployés aléatoirement et ont tous une quantité d'énergie égale et un ID unique;
- Chaque nœud connaît sa position par GPS ainsi que son énergie résiduelle et celles de ses voisins;
- Chaque nœud est capable de contrôler sa consommation d'énergie et peut calculer la probabilité de l'envoi de paquet et la probabilité de la réception de paquet basée sur la qualité du lien;
- Les décisions sur la stabilité d'une route peuvent être faites en examinant l'information récente de la qualité du lien.

Le modèle de consommation d'énergie: L'énergie consommée pour transmettre un paquet de bit dans une distance d est:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\varepsilon_{fs}d^2, & d \leq d_0 \\ lE_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d > d_0. \end{cases} \quad \text{Avec } d_0 \text{ Représente la valeur du seuil obtenu par:}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}.$$

lE_{elec} : énergie requise pour activer les circuits électroniques.

ε_{fs} , ε_{mp} : énergie requise pour l'amplification des signaux transmis pour transmettre un bit dans un espace ouvert et dans un mode multi-chemins respectivement.

L'énergie consommée pour recevoir un paquet de bit est calculée par:

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec}$$

3.4.4.2 Fonctionnement

1. Lors de la phase de découverte un nœud utilise la fonction de convenance de lien pour sélectionner son prochain saut:

$$N_H = \max_{B \in N_A} \{ PPS_B + APPR_{N_B} + 1/I_B + \frac{E_r_B}{E_i} \}$$

Avec N_H : le nœud sélectionné au prochain saut; PPS_B : La probabilité de l'envoi de paquet du nœud B; $APPR_N_B$: La moyenne de probabilité de la réception du paquet par tous les voisins de B; I_B : L'interférence du lien entre A et B (SNR).

$$PPS = \frac{\text{Number-of-Successful-Sending-Packets.}}{\text{Total-Number-of-Sending-Packets}}$$

$$APPR_{N_B} = \sum_{j=1}^{N_B} PPR_j$$

Le mérite totale (TM) d'une route qui consiste en un ensemble de K nœuds : Est la somme des mérites des liens individuels) tout le long de la route, alors le mérite total est calculé par:

$$TM_p = \sum_{i=1}^{K-1} l_{(AB)_i}$$

- Chaque nœud obtient les informations sur ses voisins par échange de beacons et mets à jour sa table de routage;
 - Chaque nœud possède maintenant les informations nécessaires pour calculer les convenances de liens.
2. Pour l'envoi rapide des paquets et diminuer le délai de bout en bout, après la phase de découverte de routes:
 - La source divise le paquet temps réel en un ensemble de petits paquets avec des numéros de séquences;
 - La source collectionne les routes en plusieurs classes selon le nombre de saut;
 - La source envoie ensuite chaque petit paquet à travers une route différente;
 - Pour assurer la réception consécutive des petits paquets au niveau du sink le paquet avec le petit numéro de séquence est envoyé à travers la route avec le minimum de nombre de saut (du minimum au maximum).

3.4.4.3 Discussion

- Gestion de la consommation d'énergie, et la qualité des liens en calculant les probabilités d'envoi et de réception et le SNR;

- Considère le temps réel en faisant la collection des routes;
- Ne considère pas le délai de bout en bout, en plus de la collection des routes qui est peu fiable: lorsqu'il y'a échec d'une route cela entraîne la perte d'un segment du paquet ou bien si un segment est retardé le message au niveau du sink n'aura plus de sens;
- Ne prend pas en considération les limites des capteurs: échange de beacon, tables de routage.

3.4.5 QoSNET : An integrated QoSNETwork for routing protocols in large scale wireless sensor networks

3.4.5.1 Description

QoSNET [49] offre une QoS dédiée aux RCSFs à large échelle, basé sur une séparation des nœuds en deux sous-réseaux : la première partie inclut les nœuds spécifiques puissants tels que des acteurs actionneurs ou des robots mobiles qui sont occasionnellement impliqués dans les décisions de routage, quant aux nœuds restants dans le deuxième sous-réseau participent entièrement au routage.

La QoS est formulée comme un problème d'optimisation qui vise à prolonger la longévité durée de vie du réseau en tenant compte des contraintes de QoS dures. Pour résoudre le problème sur les sous-réseaux respectifs, QoSNET utilise un algorithme de routage basé sur la théorie de percolation [50]. QoSNET se base sur les hypothèses suivantes:

- Un déploiement aléatoire des nœuds sur une surface à deux dimensions;
- Chaque nœud connaît sa position en utilisant des méthodes de triangulation ou de multilateration;
- Le réseau supporte l'architecture en grille;

QoSNET considère comme paramètre de QoS les délais de bout en bout, la fiabilité et l'énergie résiduelle des nœuds:

- EEPBC: le cout en batterie (énergie) de bout en bout d'un ensemble de chemins φ

$$B_{s_0 s_d}(\varphi) = \sum_{p \in \varphi} \sum_{s_i \in p} b_i(t)$$

Avec $b_i(t)$: est la capacité de la batterie du nœud au moment t. Le délai entre une source s_0 et une destination s_d à travers un ensemble de chemins φ :

$$B_{s_0 s_d}(\varphi) = 1 - \prod_{p \in \varphi} (1 - r(p))$$

$r(p) = \prod_{s_i \in p} r(s_i, s_{i+1})$: La fiabilité d'un chemin et la fiabilité du lien. L'objectif du routage dans QoSNET consiste à trouver un ensemble de chemins entre S et D qui répondent aux besoins de la QoS tout en maximisant EEPBC. Le problème de QoSNET est formulé par:

$$\begin{aligned} & \max B_{s_0 s_d}(\varphi) \\ & \text{Subject to:} \\ & D_{s_0 s_d}(\varphi) \leq D_{rep} \\ & R_{s_0 s_d}(\varphi) \geq R_{rep} \end{aligned}$$

Avec le tuple (D_{req}, R_{req}) : les besoins en délai et fiabilité spécifié par la source. Peut aussi être formulé au niveau de chaque nœud, à travers les informations échangées périodiquement par ses voisins directs par:

$$D_{s_0 s_d}(\varphi) = \min_{p \in \varphi} \{ \sum_{s_i \in p} d(s_i, s_{i+1}) \}$$

Avec $d(s_i, s_{i+1})$: le délai *entres*_{*i*} et *s*_{*i+1*} inclus le temps d'attente dans la file, le temps de contention, le temps de transmission/retransmission et le temps de propagation. La fiabilité de bout en bout des multiples chemins entre *s*₀ et *s*_{*d*} :

$$\begin{aligned} & \max L_i^b \\ & \sum_{j \in N(s_i)} x_j \log(1 - R_{ij}) \leq \log(1 - L_i^r) \\ & x_j D_{ij} \leq L_i^d \end{aligned}$$

Avec $L_i^r = (D_{rep} - D_i)/h_i$: Le délai du lien;

$L_i^r = \sqrt[h_i]{R_i}$: La fiabilité du lien;

$L_i^b = \sum_{j \in F_w(s_i)} b_j(t)$; Le cout en batterie.

3.4.5.2 Fonctionnement

1. A la détection de paquet envoyé par une source S vers une destination D, des chemins sont trouvés dans le réseau SSN (le deuxième sous réseau);
2. Un nœud intermédiaire A résolvant le problème trouve des chemins réalisables et transmet le paquet, chaque nœud exécute QosNET jusqu'à ce que le paquet arrive à destination. Si aucun chemin n'est possible dans SSN, le protocole switch vers CCN (le premier sous réseau), sinon le paquet sera supprimé.
3. Au niveau d'un contrôleur de cellule, il collecte les statistiques des membres de la cellule, calcule la probabilité de percolation et active la cellule avec cette probabilité et puis envoie une notification aux membres.

3.4.5.3 Discussion

- L'évaluation des performances a été réalisée en comparaison avec des protocoles de routage MCMP [51] qui n'est pas efficace en énergie.
- Assure la fiabilité et le délai.
- Supporte des contraintes de Qos dures.
- Ne considère pas les limites du buffer.

3.4.6 MMSPEED: Multipath Multi SPEED

3.4.6.1 Description

MMSPEED [52] a été conçu sur la base de l'approche de conception inter-couche entre le réseau et la couche MAC pour fournir une différenciation de QoS en termes de fiabilité et de délai. Du point de vue de vitesse, MMSPEED étend le protocole SPEED[53] par le biais d'inclusion de plusieurs niveaux de vitesse pour garantir la rapidité de livraison de paquets. La notion de vitesse utilisée dans ce protocole peut être illustrée par la figure 3.1. Supposons que le nœud A envoie un paquet de données à son environnement immédiat le nœud voisin B, ce qui peut réduire la distance restante jusqu'à la destination géographique (c-à-d le nœud C) environ d mètres. En fonction du délai de transmission de données estimé sur la liaison A et B, la vitesse de progression possible vers la destination à travers la transmission des données par paquets au nœud B peut être calculée comme suit :

$$\text{Speed}_{A-B} = (\text{distance}_{A-C} - \text{distance}_{B-C}) / \text{delay}_{A-B}$$

Dans le domaine de fiabilité, les exigences de fiabilité des différentes applications sont satisfaites à l'aide d'une stratégie de propagation probabiliste par les multi-chemis.

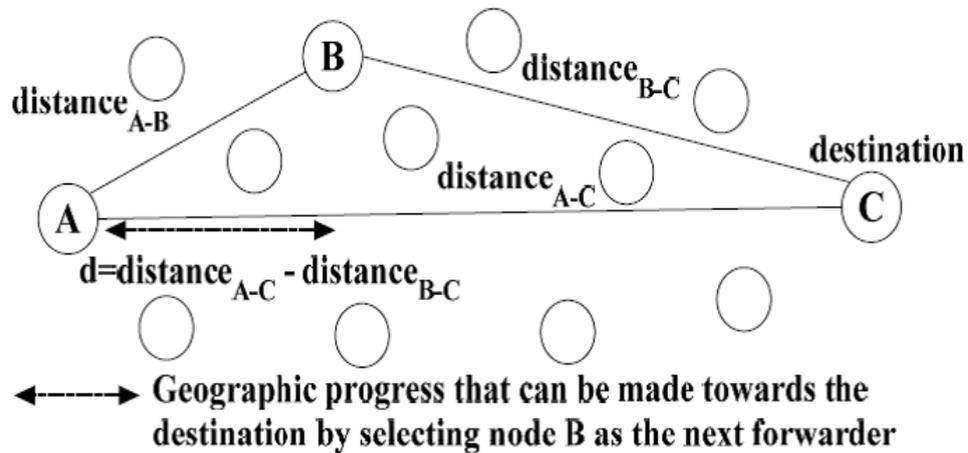


Figure 3.1: La vitesse d'avancement du nœud A au nœud B en direction du nœud destination.

Dans ce protocole, les paquets de données sont affectés à la couche de vitesse appropriée pour être placés dans la file d'attente appropriée en fonction de leur catégorie de vitesse. Après cela, les paquets de données sont traités par un mécanisme qui garantit que les paquets de haute priorité soient délivrés avant les paquets de faible priorité. Cependant, comme les protocoles MAC basés sur la contention utilisent le mécanisme CSMA/CA pour effectuer l'accès au canal [54],[55], en utilisant un schéma de priorité de transmission de données locale dans la couche de réseau n'a pas nécessairement la priorité de transmission

de données à la couche de liaison. Par conséquent, MMSPEEAD bénéficie d'un mécanisme d'accès au support prioritaire par le biais d'interactions cross-layer.

3.4.6.2 Fonctionnement

1. Chaque fois qu'un nœud source veut transmettre un paquet de données vers la destination, il détermine la vitesse de l'avancement des paquets de données en fonction de sa distance par rapport à la destination spécifiée et son délai de bout-en-bout.
2. Le classificateur de nœud source sélectionne la couche vitesse correspondante qui peut répondre aux exigences de vitesse de paquet de données. Le module de couche de vitesse sélectionné exécute toutes les décisions subséquentes de routage pour le transfert de paquets de données au cours du processus de transmission de données. Ces décisions de routage sont prises en fonction de la quantité d'accélérer les progrès qui peuvent être atteints par chaque nœud intermédiaire.
3. Si un nœud intermédiaire reçoit un paquet de données et s'aperçoit que ce paquet ne peut pas respecter son délai spécifié à travers la couche vitesse sélectionnée, le nœud récepteur peut mettre une autre couche de vitesse pour satisfaire l'exigence échéant du paquet.

3.4.6.3 Discussion

- Ce protocole prévoit la différenciation de fiabilité en contrôlant le nombre de chemins actifs et l'envoi de multiples copies des paquets de données d'origine sur plusieurs chemins;
- En conséquence, chaque nœud intermédiaire sélectionne un ensemble de prochain nœuds voisins vers le nœud de destination sur la base du taux de perte de paquets estimé sur chaque liaison et leur distance géographique de lui-même;
- offre une garantie probabiliste QoS dans deux domaines différents en combinant la technique de transfert géographique avec une approche routage multi-chemins.
- Pour satisfaire les différentes exigences de délai, chaque nœud intermédiaire tente de transmettre son paquet de données reçu au nœud voisin, qui est plus proche du nœud de destination afin d'assurer un progrès de bonne vitesse.
- ce protocole ne peut pas soutenir une longue durée de vie des applications.

3.4.7 LIEMRO: Low-InterferenceEnergy-Efficient Multipath Routing Protocol

3.4.7.1 Description

LIEMRO [56] améliore les exigences de performance des réseaux de capteurs sans fil événementiels (par exemple, le délai, le taux de livraison de données, le débit et la durée de

vie du réseau) grâce à la construction d'un nombre suffisant de chemins aux interférences minimisées.

3.4.7.2 Fonctionnement

1. LIEMRO utilise une approche itérative adaptative de pour construire un nombre suffisant de chemins nœuds-disjoints avec moins d'interférence à partir de chaque zone d'événements vers le nœud récepteur [57],[58].
2. Chaque fois qu'un événement se produit et qu'il n'y a pas de chemin de connexion pour la transmission de données vers le nœud récepteur, le nœud source sélectionné commence à établir le premier chemin par transmission d'un message RREQ vers le nœud récepteur. Lors de cette étape, le nœud source et tous les nœuds intermédiaires sélectionnent l'un de leurs voisins comme prochain saut en utilisant les équationsci dessous (i) et (ii):

$$\begin{aligned}
 Next_hop_i &= \{j | \forall j \in N_i \text{ and } Cost_{i,j} = \min_{j \in N_i} (Cost_{i,j})\} \\
 Cost_{i,j} &= (accETX_{i,sink}) \cdot \left(\frac{1}{resBatt_j}\right) \cdot (1 + interferenceLevel_j)
 \end{aligned}$$

Où N_i : est l'ensemble des voisins de nœud i ; $resBatt_j$: est le niveau résiduel de la batterie du nœud j ; $interferenceLevel_j$: est le niveau d'interférence expérimenté au nœud j ; $accETX_{i,sink}$: est la valeur cumulée ETX du nœud i au sink à travers le nœud voisin j ; ETX: valeur d'un lien calculé comme $1/pq$, où p et q indiquent la probabilité de réussite de la réception en avant et en arrière de paquets sur ce lien, respectivement.

3. Au cours de l'initialisation du réseau, la valeur accumulée ETX de tous les nœuds de capteurs vers le nœud récepteur sont calculés grâce à la construction de l'arbre optimal couvrant en utilisant le coût ETX.
4. Dès réception du premier RREQ par le nœud récepteur, il confirme le chemin découvert en transmettant un message RREP le long du chemin inverse. Alors que le message RREP passe du nœud récepteur vers le nœud source, chaque fois qu'un nœud reçoit ce message, il met à jour sa valeur de niveau d'interférence sur la base de la probabilité de réception de paquets vers l'arrière du nœud à partir de quel ce message a été reçu. Lorsque le nœud source reçoit un paquet RREP, il transmet ses paquets de données à travers le chemin construit et commence la construction d'un autre chemin par envoi d'un nouveau message RREQ vers le nœud récepteur.
5. Lors de l'établissement d'un nouveau chemin (c'est à dire, lorsque le nœud source reçoit un paquet RREP), le nœud source transmet une partie de son trafic à travers ce chemin en utilisant un algorithme basé sur la qualité de répartition de charge. L'algorithme proposé d'équilibrage de charge calcule le taux de circulation optimale des chemins établis sur la base de : niveau d'énergie résiduelle accumulée, niveau

d'interférence expérimenté, et la probabilité de succès de réception de paquets en avant et en arrière sur les liens d'un chemin.

3.4.7.3 Discussion

- LIEMRO améliore les exigences de performance des applications événementielles en distribuant le trafic réseau sur les chemins de haute qualité avec un minimum d'interférences.
- Ce protocole utilise un mécanisme dynamique de maintenance pour contrôler la qualité des chemins actifs pendant le fonctionnement du réseau et régule le débit du trafic injecté dans les chemins selon la qualité perçue de derniers chemins.
- Il représente les variations temporelles des liaisons sans fil à faible puissance et ajuste la répartition du trafic en conséquence.
- Ne prend pas en considération les effets de la capacité tampon et le taux de service des nœuds actifs pour estimer et ajuster le taux de trafic des chemins actifs.

3.5 Synthèse des protocoles étudiés

Le tableau ci-après récapitule les protocoles étudiés dans ce chapitre avec quelques paramètres de comparaison.

Ce tableau fournit une analyse des protocoles de routage multi-chemins récemment proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Cependant, ces efforts de recherches sont limités dans le sens où certains ne considèrent pas les limites des RCSFs, ce qui les rend inutilisable dans les scénarios réalistes. D'autres requiert l'information de localisation globale, pendant que certains protocoles utilisent une méthode de sélection de routes très simple qui considère uniquement l'énergie ou le nombre de saut.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l'art des principales approches de routage multi-chemins proposées dans la littérature pour les RCSFs. En effet, la technique de routage multi-chemins a démontré récemment son efficacité pour améliorer la performance des RCSFs ce qui motive le développement de nouveaux protocoles répondants aux besoins des applications considérées tout en tenant compte des contraintes caractérisant ces réseaux. L'objectif de la suite de notre travail est de proposer une approche multi-chemins permettant de traiter la problématique du routage basée sur la QoS tout en minimisant la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Plus exactement, l'approche

protocoles	Disjonction des chemins	Maintenance de route	Distribution du trafic	Sélecteur de chemin	Paramètres de performances améliorés
E2AOMDV	Lien-disjoint	Lorsque tous les chemins ont échoué	Par division de paquet	Nœud source Nœuds intermédiaires	durée de vie du réseau Délai
QEMPAR	Lien-disjoint	Pas mentionné	Par division de paquet	Nœud sources Nœuds intermédiaires	Temps réel
EQSR	Nœud-disjoint	Pas mentionné	Par division de paquet	Basé sur la probabilité de succès de la liaison des données sur les chemins actifs	Taux de livraison de données
LIEMRO	Nœud-disjoint	Lorsque moins de 2 chemins sont activés	Par division de paquet	Nœud source Nœuds intermédiaires	durée de vie du réseau Délai, Rapport de livraison de données
MMSPEED	Partiellement disjoint	Pas mentionné	copies multiples de chaque paquet	Basé sur le choix de fiabilité	Délai, fiabilité
Improving	Pas mentionné	Pas mentionné	copies multiples	basé sur la probabilité de succès de transmission de paquets à travers une route	fiabilité; durée de vie du réseau
QoSNet	Pas mentionné		Copies multiples	Basée sur la fiabilité des liens	durée de vie du réseau Fiabilité, Délai

Table 3.1: Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins.

consiste à une amélioration du protocole E2AOMDV, en intégrant la fonction du codage réseau présenté dans le protocole EQSR.

4

Le protocole QoS-based E2AOMDV

4.1 Introduction

Le routage multi-chemins présente plusieurs avantages dans les réseaux de capteurs sans fil. A savoir un équilibrage de charge en évitant la congestion et les goulots d'étranglements, Une fiabilité et une tolérance aux fautes des copies multiples des données à travers les différents chemins et un délai qui peut être réduit en divisant le message en segments qui seront envoyés simultanément à travers les différents chemins. Cependant les protocoles existants présentent certaines limites.

Dans ce chapitre, nous présentons un nouveau protocole de routage multi-chemins simple et efficace permettant de garantir une QoS dans les réseaux de capteurs sans fil tout en respectant les limites des ressources des nuds capteurs. Ce protocole est nommé QoS-based-E2AOMDV (Quality of Service-based Energy Efficient AOMDV), une version améliorée du protocole E2AOMDV [45], qui est un protocole de routage multi-chemins efficace en énergie mais qui ne garantit pas la QoS. QoS-based-E2AOMDV tire profit de la technique du codage réseau implémentée dans le protocole EQSR (Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks) [46] pour garantir la QoS en termes de fiabilité et de délai.

L'algorithme de routage que nous proposons fait un compromis entre la qualité de service et la quantité d'énergie dissipée pour la transmission de bout en bout à travers le codage des paquets avant leur transmission via les multiples chemins sélectionnés à base de leur énergie surplus nodales maximale.

Dans ce qui suit, nous mentionnons le contexte et motivation, ainsi que le principe général de la solution proposée et les hypothèses considérées. Ensuite, nous détaillons le fonctionnement du protocole.

4.2 Contexte et Motivation

L'étude critique des protocoles multi-chemins présentés dans le chapitre précédent et particulièrement le protocole E2AOMDV nous a permis de ressortir avec quelques inconvénients et manques dans la conception de ce dernier, notamment la garantie de la QoS. Pour y remédier, nous proposons un nouveau protocole QoS-based E2AOMDV qui fera le sujet du présent chapitre. Nous envisageons donc assurer la fiabilité et réduire le délai de transmission de données tout en prémunissant l'énergie à travers le couplage de la technique de routage multi-chemins avec la technique de codage réseau.

4.3 Le principe général de la solution proposée

Dans notre démarche, on a opté pour améliorer le protocole E2AOMDV en proposant une approche permettant de traiter le problème de routage multi-chemins basée sur la QoS, tout en minimisant la consommation d'énergie dans les RCSFs. Plus exactement l'approche consiste à l'intégration du mécanisme de codage réseau inspiré du protocole EQSR dans le processus de routage d'E2AOMDV. C'est-à-dire injecter des codes correcteurs basés sur l'opérateur XOR aux paquets de donnée segmentés avant leur transmission permettant ainsi au nud récepteur de détecter et de corriger les erreurs sans demander la retransmission à la source.

Contrairement au protocole EQSR qui détermine les chemins nuds-disjoints, notre protocole construit des chemins liens-disjoints et choisit que les chemins optimaux parmi ceux disponibles à partir de la technique de sélection consciente d'énergie et équilibre la consommation d'énergie nodale pour empêcher un ou plusieurs nuds d'épuiser leur énergie. Nous procédons par la suite à la division des paquets de données en N segments de taille égale, puis nous ajoutons $M+1$ en-tête de codes de correction d'erreurs basés sur le XOR à chaque segments (sous paquet) pour être enfin livrés à la destination avec le E2AOMDV.

4.4 Hypothèses

Notre protocole de routage multi-chemins QoS-based-E2AOMDV considère les hypothèses suivantes:

- Les capteurs sont déployés aléatoirement dans la zone à surveiller.
- Les capteurs sont statiques.

- Les capteurs sont homogènes (en termes de capacités de capture, de communication et d'énergie).
- Chaque capteur possède un identificateur unique **ID** et est capable de calculer son statut énergétique.
- Tous les nœuds capteur participent dans le routage.
- Le nœud source suppose l'énergie initiale du nud comme son énergie surplus.
- Ne requiert pas des informations de positionnement, donc n'a pas besoin d'appliquer une technique de localisation [60], [61],[62].

4.5 Description détaillée du protocole QoS-based E2AOMDV

Le protocole de routage QoS-based E2AOMDV (Quality of Service based Energy Efficient Ad hoc On Demand Multipath Distance Vector), reprend le mécanisme de la sélection des chemins consciente en énergie et le concept de l'énergie surplus nodale maximale du protocole E2AOMDV [45] pour prolonger la durée de vie des nuds capteurs.

Pour assurer la fiabilité et un délai réduit, notre protocole intègre la technique de codage réseau implémenté par le protocole EQSR aux paquets de données avant leur transmission. Pour mieux comprendre le fonctionnement de notre protocole noud détaillons dans ce qui suit les différentes phases qui le composent:

4.5.1 Phase de construction de chemins

A. Découverte de routes

La découverte de route dans QoS-based E2AOMDV utilise le même mécanisme que celui du protocole E2AOMDV [45] détaillé dans le chapitre précédent. La découverte est initiée par la source en calculant différentes N routes, allant de la source jusqu' à la destination, tout en évitant la formation de boucles de routage.

La procédure de découverte de routes est basée sur la procédure de découverte du protocole AOMDV [36] avec la différence de la sélection des chemins consciente en énergie et le calcul de l'énergie surplus nodale maximale. Les messages RREQ inclus deux champs additionnels, notamment le facteur readiness et l'énergie surplus maximale. Les paquets RREQ comprennent les champs suivants:

- **Source**:représente l'identificateur du nud source expéditeur de message.
- **Destination**:représente l'identificateur du nud de destination.

Source	Destination	Sequence Number	hop count	Route list { next hop1, hopcount1, readiness(), max-surplus energy1} { next hop2, hopcount2, readiness(), max-surplus energy2} . { next hop n, hop count n, readiness n () , max-surplus energy n}	Expiration time
--------	-------------	-----------------	-----------	---	-----------------

Figure 4.1: Structure de message RREQ

- **Sequence number**:représente le nombre de séquence du nud, il est mis à jour à chaque saut.
- **hop count**:nombre de sauts.
- **Route List**:la liste des chemins.
- **next hop**:le prochain saut.
- **readiness**:représente le facteur de disponibilité du nud intermédiaire.
- **max-surplus energy**:l'énergie surplus maximale.
- **Expiration time**:temps d'expiration.

L'idée de base est de sélectionner un ensemble de chemins parmi les chemins disponibles en employant la technique de sélection consciente en énergie pour équilibrer la consommation énergétique entre les nuds capteurs. Cette dernière consiste à appliquer des considérations énergétiques dans la sélection du meilleur chemin. La spécification E2AOMDV a une variable "readiness" qui représente la disponibilité de ce nud pour agir comme un nud intermédiaire. Chaque nud calcule son propre statut énergétique et déclare un état approprié. La sélection de ce dernier est basée sur la capacité de la batterie et la durée de vie prévue d'un nud. Dans le cas où le facteur readiness d'un neoud est mis à 'Discard', un message Route Error (RERR) message est renvoyé à la source au lieu de d'un message RREP. A la fin de cette étape nous aurons N routes sélectionnées. Le tableau suivant indique l'heuristique utilisée pour associer un état ("Discard", "Moderate", "High") à une paire (battery capacity, lifetime).

Battery/Lifetime	Short [$< 10s$]	Medium [10s $<$ lifetime $<100s$]	Long [$> 100s$]
Low [< 0.1]	EA-Discard	EA-Discard	EA-Discard
High [> 0.1]	EA-Discard	EA-Acceptmoderate	EA-Accept high

Table 4.1: Sélection fondée sur l'état de préparation de l'énergie.

- **EA-Discard**: désigne que le nud ne peut pas agir comme nud intermédiaire.
- **EA-Accept moderate**: désigne que le nœud accepte d’agir comme nud intermédiaire avec durée de vie moyenne.
- **EA-Accept high**: désigne que le nud accepte d’agir comme nud intermédiaire avec longue durée de vie.

B. Trouver l’énergie surplus nodale maximale

Lorsqu’un nud intermédiaire reçoit un message RREQ, il vérifie si le numéro de séquence spécifié dans ce message est plus grand que son propre numéro de séquence. Dans ce cas, il compare son énergie surplus nodale à l’énergie surplus nodale du message RREQ. Dans le cas où son énergie est plus grande que celle spécifiée dans le message RREQ, il met à jour le message RREQ avec sa propre énergie surplus nodale. De cette façon, il est possible de trouver l’énergie surplus nodale maximale parmi tous les nuds d’un chemin donné.

C. Sélection de K routes

Après l’achèvement de la phase de découverte et les chemins ont été construits, nous avons besoin de sélectionner un sous ensemble des N chemins disponibles pour transférer le trafic de la source à la destination avec une borne de livraison des données souhaitée fournie par α et les classer par ordre décroissant selon leur énergie surplus nodale. Pour trouver le nombre de chemins nécessaires, nous supposons que chaque chemin est associé avec un certain taux $p_i (i = 1, 2, \dots, N)$ qui correspond à la probabilité d’avoir réussi à amener un message à la destination. Le nombre de chemins nécessaires est calculé comme suit [63]:

$$K = X_\alpha \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N p_i(1 - p_i) + \sum_{i=1}^N p_i}$$

Où X_α est la borne correspondante à la distribution normale pour différents niveaux de α . Le tableau 2 énumère quelques valeurs pour X_α .

α	95%	90%	85%	80%	50%
X_α	-1.65	-1.28	-1.03	-1.85	0

Table 4.2: Quelques valeurs de la borne α

4.5.2 Répartition de trafic et transmission de données

A. Répartition de trafic et segmentation des paquets

Le schéma d’allocation de trafic fragmente en premier les paquets en un nombre égal de sous-paquets de même taille (ou segments), puis ordonnance les sous-paquets simultanément pour transmission à travers les K chemins disponibles.

B. Génération des FEC

Avant l'ordonnancement des sous-paquets, le système de répartition du trafic ajoute des codes de correction d'erreur pour améliorer la fiabilité de la transmission et pour augmenter la résilience aux défaillances de chemins et de veiller à ce qu'une partie essentielle du paquet soit reçue par le destinataire sans encourir aucun délai ni plus de consommation d'énergie. Pour chaque segment nous générons un code correcteur qui consiste en une opération de **OU exclusif** comme suit:

$$C_0 = S_0 \oplus S_1 \oplus S_0 \oplus \dots S_{N-1}$$

$$C_1 = S_1 \oplus S_2 \oplus S_3 \oplus \dots S_M$$

$$C_2 = S_2 \oplus S_3 \oplus S_4 \dots \oplus \dots S_{(M+1) \bmod N}$$

$$C_3 = S_3 \oplus S_4 \oplus S_5 \dots \oplus \dots S_{(M+2) \bmod N}$$

...

$$C_M = S_M \oplus S_1 \oplus S_2 \dots \oplus \dots S_{(M+K) \bmod N}$$

Où \oplus représente l'opération OU exclusif.

Les codes correcteurs sont calculés en fonction des bits d'information pour fournir de la redondance d'informations. Nous utilisons un algorithme de codage basé sur le XOR comme celui présenté dans [64]. Cet algorithme ne nécessite pas une grande puissance de calcul ni de l'espace de stockage élevé.

C. Encodage des données et transmission

Après la sélection d'un ensemble de plusieurs chemins, et après l'ajout de codes FEC, le nud source peut commencer à envoyer les données à la destination le long des chemins. Les segments du message d'origine S_0, S_1, \dots, S_{n-1} et les codes de correction d'erreurs C_0, C_1, \dots, C_m sont alors envoyés à travers les K multiples chemins disponibles.

La Figure (4.2) Montre la segmentation du paquet et les champs de chaque segment (ou sous paquet).

- **ID** : Identification représente l'identificateur unique du paquet, attribué à chaque message après fragmentation. Cet ID permet au Sink de réassembler les messages sans mélanger entre les segments des différents messages.
- **MS** : More Segments ce bit est met à 1 pour tous les segments sauf le dernier, qui est à 0. La valeur de 0 dans le champ MS indique la réception du dernier segment.

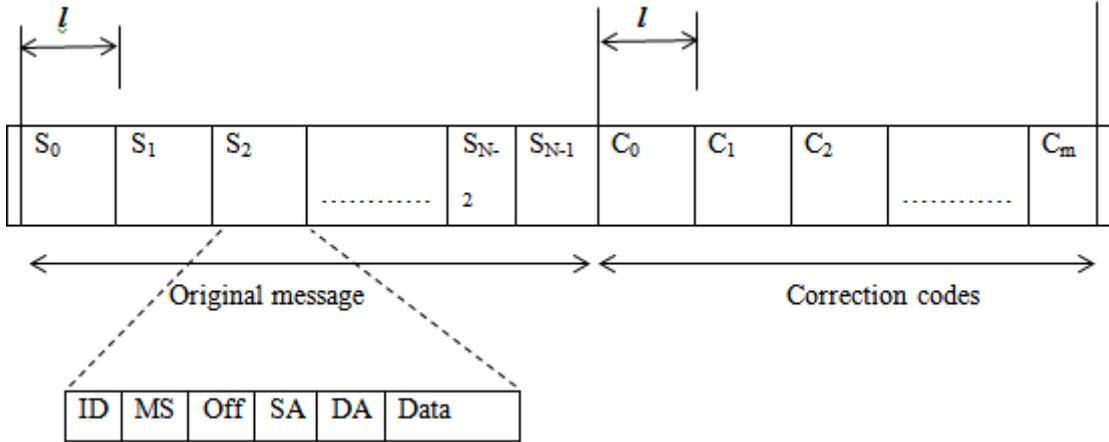


Figure 4.2: Format du paquet (message originale et les codes de correction).

- **Offset** : Segment Offset représente la position de segment dans le paquet. Ce champ résout le problème de séquençement.
- **SA** : Source Address adresse de la source.
- **DA** : Destination Address adresse de destination.
- **Data** : upto 256 bytes longueur des données.

4.5.3 Décodage et Récupération

Au niveau du nud sink, les segments sont recueillis, rassemblées et le message original est reconstitué. Si au moins M segments sont perdus sur les $N+M$ données totales et en-tête des codes correcteurs, les N segments originaux du message peuvent être récupérés en utilisant des transformations linéaires appropriées (dans notre cas l'opération XOR). Le message d'origine pourrait être récupéré comme suit [63]:

$$S_1 = C_0 \oplus C_2$$

$$S_2 = C_0 \oplus C_3$$

...

$$S_M = C_0 \oplus C_1$$

4.5.4 L'organigramme du protocole:

L'organigramme de la figure (4.3) récapitule les phases de l'algorithme QoS-based E2AOMDV.

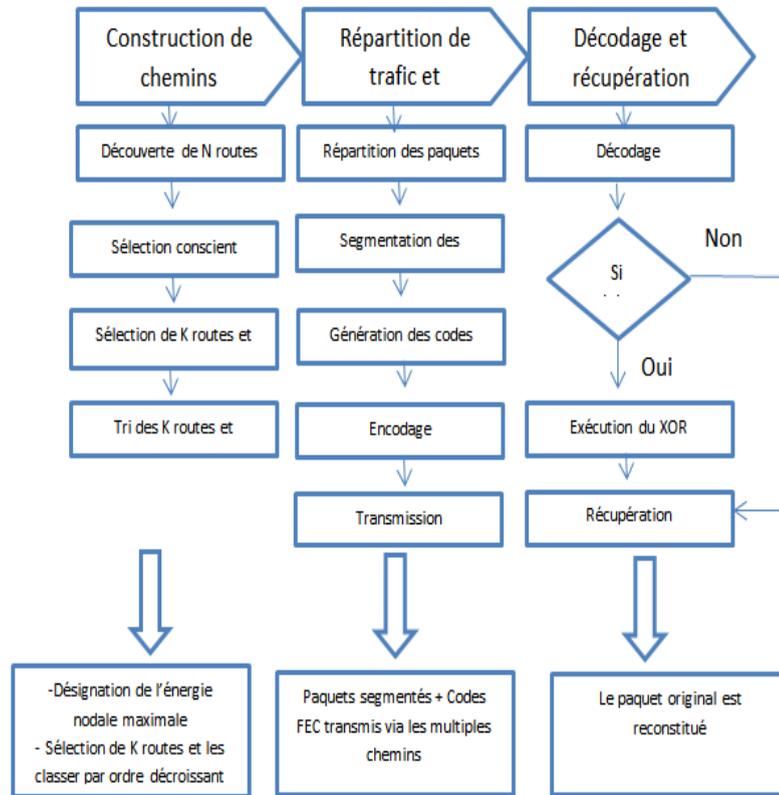


Figure 4.3: Organigramme du protocole QoS-based E2AOMDV

4.6 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre, un nouveau protocole de routage multi-chemins avec QoS et efficacité énergétique pour les réseaux de capteurs sans fil, appelé QoS-based E2AOMDV qui étend le protocole E2AOMDV.

Le QoS-based E2AOMDV calcule plusieurs chemins allant de la source de trafic jusqu'à la destination et équilibre la consommation de l'énergie à travers tous les nœuds mobiles du réseau en envoyant les paquets de données sur des routes différentes. Il réduit ainsi, au minimum la variance dans les énergies résiduelles de tous les nœuds.

QoS-based E2AOMDV est adapté à la fois, à la QoS et à l'énergie consommée grâce à deux mécanismes : la sélection consciente d'énergie et le codage réseau.

La sélection consciente d'énergie donne la possibilité de choisir les chemins avec des nœuds non épuisés en énergie qui a pour avantage de prolonger la longévité du réseau. Le codage réseau quant à lui permet de garantir la fiabilité ainsi que le délai de bout en bout de transmission.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont une nouvelle technologie qui a surgit après les grands progrès technologiques concernant le développement des capteurs intelligents, des processeurs puissants et des protocoles de communications sans fil. Ce type de réseau composé de certaines ou de milliers d'éléments, a pour but la collecte de données de l'environnement, leur traitement et leur dissémination vers le monde extérieur. Des propriétés comme la flexibilité, les hautes capacités de captage, coût réduit, l'installation rapide sont les caractéristiques qui ont permis à cette nouvelle technologie d'avoir de nouveaux domaines d'applications multiples. Ce large étendu d'applications fera de cette technologie émergente une partie intégrale de nos vies futures.

Cependant, ces réseaux sont limités dans leurs performances et leurs interactions avec l'environnement et ils posent plusieurs défis à relever, notamment le défi du routage.

En effet, plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature afin d'améliorer les performances des RCSFs et de répondre aux besoins des applications considérées. En outre, plusieurs classifications de ces protocoles ont été proposées.

Nous nous intéressons dans ce mémoire à la classe des protocoles de routage multi-chemins, car notre objectif est la mise en oeuvre d'un protocole de routage multi chemins qui puisse garantir la qualité de service (QoS) tout en réservant l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Pour cela, nous avons mené une recherche sur les concepts de base des réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, les contraintes de conception, dans le but de mettre en évidence les services critiques du réseau. Donc nous avons donné un aperçu sur les RCSFs et présenté certaines de leurs applications. Nous avons aussi exposé des différents problèmes concernant ces réseaux notamment notre problématique de recherche qui est le routage.

Par la suite, nous avons réalisé une étude critique des protocoles de routage multi chemins dans les RCSFs. Cette étude, a révélé les avantages de la technique de routage multi-chemins pour l'amélioration des performances des RCSFs. Néanmoins, à l'issue de cette recherche, nous avons constaté l'insuffisance des protocoles existants et la nécessité de développer d'autres solutions intelligentes qui garantiront d'avantage de qualité de service (QoS) tout en considérant les ressources limitées des nœuds capteurs notamment l'énergie.

Pour pallier à ce problème, nous avons proposé un nouveau protocole de routage multi chemin basé sur la qualité de service, nommé QoS-based E2AOMDV (Quality of Service based Energy Efficient Ad hoc On Demand Multipath Distance Vector), qu'est une version améliorée du protocole E2AOMDV existant. En fait, la contribution consistait à l'intégration d'un nouveau mécanisme de transmission de données basé sur la notion de codage réseau afin de garantir la QoS en termes de fiabilité et de délai tout en préservant l'énergie.

En guise de perspectives,

- L'adaptation d'un mécanisme de gestion de priorités pourra différencier les types de trafics temps réel et non temps réel.
- L'évaluation de notre protocole en utilisant un simulateur adapté aux réseaux de capteurs tel que NS-2, J-SIM.
- Le traitement de la mobilité des capteurs; l'une des hypothèses de notre travail, est que les capteurs restent statiques après leur déploiement. En effet, il s'agira de réévaluer le routage en fonction de la mobilité.

Bibliographie

- [1] F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam et E.Cayici "A survey on sensor networks". IEEE Communications Magazine.Vol.40,No.8, PP.102-114,Aout,2002.
- [2] M.Lehsaini, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs: application à la domotique", Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur et Université de Franche-Comte U.F.R Sciences et Techniques Ecole Doctorale SPIM, Thèse de Doctorat, 2009.
- [3] KhadarFadhila. Contrôle de topologie dans les réseaux de capteurs: de la théorie à la pratique. Thèse de doctorat Université de Lille, 2009.
- [4] BilelNefzi. Mécanismes auto-adaptatifs pour la gestion de la Qualité de Service dans les réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat Université de Nancy, 2011.
- [5] Baadache. état de l'art sur les RCSF .USTHB Université de Sciences Techniques Houari Boumediene de Bab ezzouar Algérie, 2004.
- [6] M.J.Brown, "Users Guide Developed for the JBREWS Project", Technical Report LA-UR-99-4676, Los Alamos National Laboratory of California University.
- [7] C. Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, 2003.
- [8] T.B.Gosnell, J.M.Hall, C.L.Ham, D.A.Knapp, Z.M.Koenig, S.J.Luke,B.A.Pohl, A.Schach, V.Wittenau, and J.K. Wolford, "Gamma-Ray Identification of Nuclear Weapon Materials".
- [9] E.M.Petriu, N.D.Georganas, D.C.Petriu, D.Makrakis, and V.Z.Groza, "Sensor based information appliances".
- [10] P. Johnson and D.C Andrews "Remote continuous monitoring in the home", Telemedicine and Telecare, June 1996, Vol. 2, 2, pp. 107-113.
- [11] Support de la QoS dans les réseaux de capteurs sans fil: Un Sondage Dazhi Chen et Pramod K. VarshneyMinistere de la EECS, Université de Syracuse Syracuse, NY, 13244 U.S.A.

- [12] Mécanismes auto-adaptatifs pour la gestion de la Qualité de Service dans les réseaux de capteurs sans fil. Bilel NEFZI. Thèse 2011.
- [13] K.I.Park.QoS in packet network.The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Kluwer, 2005.
- [14] K.Akkaya and M.Younis. A survey on routing protocols for wireless sensornetworks. *Ad Hoc Networks*, 3(3):325-349, 2005.
- [15] J.Padhye R.Draves and B.Zill.Comparison of routing metrics for staticmulti-hop wireless networks.Proceedings of ACM SIGCOM, 2004.
- [16] NaouelDoufene Hani Hadjammar. Routage dans les réseaux de capteurs:optimisation du protocole Directed Diffusion. PhDthesis, Institut National de formation en Informatique INI, Algérie, 2006.
- [17] Nadjib Baadache Lyes Khelladi. Les réseaux de capteurs : état de l'art. Technical report, INI, Algerie, Février 2004.
- [18] I. Stojmenovic and X. Lin. Power aware localized routing in wireless networks. *Power*, 12(11) :1122-1133, 2004.
- [19] K. Yang. A study on power-friendly routing protocols for sensor networks. Technical report, University of Essex Department of Electronic Systems Engineering, Mars 2005.
- [20] Mohammed AISSANI. Optimisation de routage dans les réseaux de capteur pour les applications temps réel, 2012.
- [21] Samra BOULFEKHAR. Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs. PhDthesis, Ecole Doctorale Réseaux et Systèmes Distribués, Université de Béjaia, 2006.
- [22] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," *Proc. of the ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 174-185, Seattle, WA, Aug. 17-19, 1999.
- [23] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 11(1), pp. 2-16, February 2003.
- [24] L.T. Nguyen, X. Defago, R. Beuran, and Y. Shinoda, "An Energy-Efficient Routing Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 5th IEEE Int'l Symposium on Wireless Communication Systems*, pp.568-572, Reykjavik, Iceland, October 21-24, 2008.

- [25] J. Heidemann Y. Xu and D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing. ACM Press New York, NY, USA, pages 70-84, 2001.
- [26] C. Adjih, T. Clausen, P. Jacquet, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A.Qayyum L. Viennot, "Optimized Link State Routing Protocol", RFC 3626, IETF, 2003.
- [27] M. I. Razzak, S. A. Hussain, A. A. Minhas and M. Sher, "Collaborative Image Compression in Wireless Sensor Networks". International journal of computational cognition (<http://www.ijcc.us>), vol. 8, no. 1, march 2010.
- [28] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das, "Ad hoc on demand distance vector (aodv) routing". In IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-05.txt. [En ligne] 2000.
- [29] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, "DSR The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks". In Ad Hoc Networking, edited by Charles E. Perkins, chapter 5, Addison-Wesley, 2001, pp. 139-172.
- [30] Zone Routing Protocol (ZRP) Nicklas Beijar Networking Laboratory, Helsinki University of Technology P.O. Box 3000, FIN-02015 HUT, Finland Nicklas.Beijar@hut.fi.
- [31] M. Jiang, J. Li, and Y.C. Tay. "Cluster Based Routing Protocol (CBRP)" , IETF MANET Working Group, Internet-Draft, 1999.
- [32] M. ACHIR and L. OUVRY. A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-path source routing protocol (mpsr). In ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE), Ile de la Réunion, France, Avril 2005.
- [33] H-S. KIM, T-F. ABDELZAHER, and W-H. KWON. Minimum energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. In Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), volume 7, pages 193-204, New York, USA, 2003.
- [34] K. Sohrabi and J. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless SensorNetwork," IEEE Personal Communications, Vol. 7(5), pp. 16-27, October 2000.
- [35] T. He, J.A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, "A Spatiotemporal Communication Protocol for Wireless Sensor Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 16(10), pp. 995-1006, October 2005.
- [36] Marina, M.K.; Das, S.R. On-Demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks In Proceedings of the 9th International Conference on Network Protocols, Riverside, CA, USA,11-14 November 2001; pp. 14-23.
- [37] MarjanRadi ,BehnamDezfouli , Kamalrulnizam Abu Bakar and Malrey Lee : Multipath Routing in Wireless Sensor Networks: Survey and ResearchChallenges.2012.

- [38] Lou, W.Liu, W.Zhang, Y. Performance Optimization Using Multipath Routing in Mobile AdHoc and Wireless Sensor Networks. *Combinator.Optim.Commun.Netw.* 2006, 2, 117-146
- [39] Amadou Baba Bagayoko - Béatrice Paillassa. Comparaison des stratégies de redondance dans les réseaux ad hoc ... "CFIP 2011-Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles 2011.
- [40] P.Chen and al, "Multi-path Routing Metrics for Reliable Wireless Mesh Routing Topologies", TRITA-EE 2011:033.
- [41] R.Sumathi and M.G.Srinivas : A Survey of QoS Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. *J Inf Process Syst*, Vol.8, No.4, December 2012.
- [42] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu & J. Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In 4th Annual Acm/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 85-97, *Dallas, USA*, 1998.
- [43] S.R.Das, R.Castaneda, J.Yan et R. Sengupta. Comparative performance evaluation of routing protocols for mobile ad hoc networks. In 7th International Conference on Computer Communications and Networks, pages 153-161, Lafayette, USA, 1998.
- [44] E. M. Royer et C. K. Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, no. 2, pages 46-55, 1999.
- [45] G.SARA, "Energy Efficient Ad Hoc On Demand Multipath Distance Vector Routing Protocol", *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol 2, No.3, November 2009.
- [46] J. Ben-Othman, B. Yahya, "Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks", *J. Parallel Distrib. Comput.* 70 (2010).
- [47] Sanaz Naziri et al, "Improving Lifetime and Reliability in Routing Real-Time Wireless Sensor Networks based on Hybrid Algorithm", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9): 1105-1109, 2011.
- [48] Saeed Rasouli Heikalabad et al, "QEMPAR: QoS and Energy Aware Multi-Path Routing Algorithm for Real-Time Applications in Wireless Sensor Networks", *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, Issue 1, January 2011.
- [49] T. Hounghbadji, S. Pierre, "QoSNET: An integrated QoS network for routing protocols in large scale wireless sensor networks", *Computer Communications* 33 2010.1334-1342.
- [50] Percolation Theory Dr. Kim Christensen Blackett Laboratory Imperial College London Prince Consort Road SW7 2BW London United Kingdom October 9, 2002.

- [51] Huang, X.Fang, Y. MulticonstrainedQoS Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. *J.Wirel. Netw.* 2007, 14, 465-478.
- [52] Felemban, E.Lee, C.G.Ekici, E.MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks. *IEEE Trans. Mobile Comput.* 2006, 5, 738-754.
- [53] Tian, H.Stankovic, J.A.Chenyang, L.Abdelzaher, T.SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, USA, 19-22 May 2003*; pp. 46-55.
- [54] Dezfouli, B.Radi, M.AbdRazak, S.A Cross-Layer Approach for Minimizing Interference and Latency of Medium Access in Wireless Sensor Networks.*Int.J.Comput.Netw.Commun.*2010, 2,126-142.
- [55] Dezfouli, B.; Radi, M.; Nematbakhsh, M.A.; Razak, S.A. A Medium Access Control Protocol with Adaptive Parent Selection Mechanism for Large-Scale Sensor Networks. In *Proceedings of the 2011 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications (WAINA '11), Singapore, 22-25 March 2011*; pp. 402-408.
- [56] Lu, Y.M.; Wong, V.W.S. An Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *Int. J. Commun. Syst.* 2007, 20, 747-766.
- [57] Radi, M.; Dezfouli, B.; Razak, S.A.; Bakar, K.A. LIEMRO: A Low-Interference Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Improving QoS in Event-Based Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 4th International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM '10), Venice, Italy, 18-25 July 2010*; pp. 551-557
- [58] Radi, M.; Dezfouli, B.; Bakar, K.A.; AbdRazak, S.; Nematbakhsh, M.A. Interference-Aware Multipath Routing Protocol for QoS Improvement in Event-Driven Wireless Sensor Networks.*Tsinghua Sci. Tech.* 2011, 16, 475-490
- [59] Huang, X.; Fang, Y. MulticonstrainedQoS Multipath Routing in Wireless Sensor Networks.*J. Wirel. Netw.*2007, 14, 465-478.
- [60] Y. Zhou and K. Charkrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual force. In *Proc. Of IEEE Annual Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*, 2003.
- [61] J.Cui Z.Zhou and A.Bagtzoglou.Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks.in *Proc. of IEEE Annual Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*, 2008.

- [62] Y. Zhou and K. Chakrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual force. In Proc. Of IEEE Annual Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM), 2003.
- [63] S.Dulman, T.Nieberg, J.Wu, P.Havinga, Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks, in: The Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC-2003, vol. 3, New Orleans, Louisiana, USA, March 2003.
- [64] Zhiqiang Xiong, Zongkai Yang, Wei Liu, Zhen Feng, A lightweight FEC algorithm for fault tolerant routing in wireless sensor networks, in: The Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM-2006, Wuhan, China, September 2006.

RÉSUMÉ

Les réseaux de capteurs sans fil constituent un thème de recherche en grand essor. Ce qui soulève plusieurs problématiques notamment celle du routage. Ce dernier permet d'établir une route de plus court chemin en terme de nombre de saut entre deux nuds source et destination. Dans le contexte d'une qualité de service, le but du protocole de routage est de trouver la meilleure route selon les critères précis de la qualité de service souhaitée (délai, taux de perte, quantité de bande passante, ...), et reposant sur des liens fiables.

Le but de ce travail étant de proposer une solution de routage multi-chemins dont l'objectif est de garantir la QoS tout en respectant les contraintes inhérentes aux réseaux de capteurs sans fil. Nous avons proposé un protocole de routage multi chemins avec QoS intitulé QoS-based E2AOMDV (Quality of Service based Energy Efficient Ad hoc On Demand Multipath Distance Vector), qui représente une amélioration du protocole E2AOMDV existant, par l'intégration d'un nouveau mécanisme de transmission des données basé sur la notion de codage réseau présenté afin de garantir la fiabilité tout en préservant l'énergie.

Mots-clés : Réseaux de capteurs sans fil, Routage multi-chemins, Qualité de service, Codage réseau.

ABSTRACT

Wireless sensor networks are a research topic in great expansion which make raises several issues, including routing issue. This allows establishing a shortest path in terms of number of hops between source and destination nodes. As part of quality of service, the goal of routing protocol is to find the best route according to specific criteria of the desired quality of service (delay, loss rate, amount of bandwidth,) and based on reliable links.

The aim of this work is to propose a multi-path routing solution in order to ensure QoS while respecting the constraints of the wireless sensor networks. We have proposed a multi-path routing protocol with QoS called QoS-based E2AOMDV (Quality of Service Ad hoc On Efficient based Energy Demand Multipath Distance Vector) because it is an improvement of the existing E2AOMDV protocol, by the integration of a new mechanism of data transmission based on the notion of network coding introduced to ensure reliability while maintaining energy.

Key-words: wireless sensor networks, multi-path routing, Quality of Service, Network Coding