

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences exactes
Département d'Informatique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Informatique

Option :

Administration et sécurité des réseaux

Thème

Routage multi-chemins avec QoS dans les RCSFs

Présenté par :

M^r ACHAT Amine

M^r AOUZELLAG Toufik

Devant le jury composé de :

Présidente : *M^{me} REBOUH* Nadjette

Examinatrice : *M^{me} TIAB* Amel

Promotrice : *M^{me} BOULFEKHAR* Samra

Année universitaire 2019/2020

- *Dédicaces* -

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A Mes chers parents

Vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour

Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie, bonheur et santé

Mon cher frère ASSALAS Ma chère sœur IMENE

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Les familles ACHAT, BOUKHIBA, AOUZELLAG

Mes très chers amis

Pour notre profonde amitié et agréables moments que nous avons vécus ensemble.

A mon binôme TOUFIK

Qui compte beaucoup à mes yeux, tu es un ami, tu es un frère pour moi, que dieu te protège, je te souhaite un avenir plein de réussite et de succès.

Enfin, une spéciale dédicace à notre promotrice **Mme.BOULFEKHAR Samra**, cette personne qui a été toujours présente et disponible pour nous, sans elle ce mémoire ne serait jamais réalisé.

AMINE

- *Dédicaces* -

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A Mes chers parents

vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour

Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie, bonheur et santé

Mon cher frère BILEL Mes chères sœurs SAMAH SABRINA SOUHILA CELIA

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Les familles AOUZELLAG, CHEURFI ,ACHAT

A mes oncles AZZEDINNE sa femme KARIMA et FOUJILE

Mes chères cousin YANIS NESSRINE MERIEME AMINE RIAD A mes petits ET petites nieces, ABIR, CHIHAB EDDINE, SAIF EDDINE, SIRINE, SARA, LINA en leurs souhaitant le bonheur et la réussite

Mes très chers amis KAHINA TAIB FERIEL AMINE SAID KOSSA HAMZA ABID NASSIM

Pour notre profonde amitié et agréables moments que nous avons vécus ensemble.

A mon binôme AMINE

Qui compte beaucoup à mes yeux, tu es un ami, tu es un frère pour moi, que dieu te protège, je te souhaite un avenir plein de réussite et de succès.

Enfin, une spéciale dédicace à notre promotrice **Mme. BOULFEKHAR Samra**, cette personne qui a été toujours présente et disponible pour nous, sans elle ce mémoire ne serait jamais réalisé.

TOUFIK

- *Remerciements* -

Nous tenons à exprimer de tout coeur nos sincères remerciements à notre promotrice **Mme.BOULFEKHAR Samra** pour avoir bien voulu nous accompagner tout au long de la préparation de ce projet, pour les sages conseils et recommandations qui nous ont permis de réaliser ce modeste travail

Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude

Nous tenons à remercier chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département d'Informatique et du département Mathématique de l'université **ABDERRAHMANE MIRA de Bejaia**.

Ainsi qu'à ceux et celles qui par, leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions.

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fil	3
1.3 Architecture et composants d'un RCSF	4
1.4 Définition d'un capteur	5
1.5 Architecture d'un capteur	5
1.5.1 Architecture matériel	5
1.5.2 Système d'exploitation	6
1.5.2.1 Tiny OS	7
1.6 Modèle de nœuds	7
1.7 Caractéristiques d'un RCSF	8
1.7.1 Contrainte d'énergie	8
1.7.2 Forte densité	8
1.7.3 Mobilité	8
1.7.4 Couverture limitée	9
1.7.5 Fiabilité	9
1.7.6 Débit	9
1.7.7 Ressources limitées	10
1.7.8 Sécurité physique limitée	10

1.8	Domaine d'applications	10
1.8.1	Applications militaires	10
1.8.2	Applications de santé	11
1.8.3	Applications commerciales	11
1.8.4	Supervision des structures et des phénomènes sismiques	13
1.8.5	Domotique	13
1.9	La communication dans les réseaux de capteurs	13
1.9.1	Pile protocolaire	14
1.9.1.1	Couche application	14
1.9.1.2	Couche transport	15
1.9.1.3	Couche réseau	15
1.9.1.4	Couche liaison de données	15
1.9.1.5	Couche physique	15
1.9.2	Niveaux intégrés dans la pile protocolaire	16
1.9.2.1	Plan de gestion d'énergie	16
1.9.2.2	Plan de gestion de mobilité	16
1.9.2.3	Plan de gestion de tâche	16
1.10	Conclusion	16
2	Le Routage dans les réseaux de capteurs sans fil	17
2.1	Introduction	17
2.2	Définition du routage	17
2.3	Objectifs du routage	18
2.4	Considérations de conception d'un protocole de routage dans les RCSFs	19
2.4.1	Déploiement des nœuds	19
2.4.2	Consommation d'énergie	19
2.4.3	Modèle de délivrance des données	19
2.4.4	Tolérance aux pannes	19
2.4.5	Scalabilité	20
2.4.6	Dynamicité du réseau	20
2.4.7	Media de transmission	20
2.4.8	Connectivité	20
2.4.9	Couverture	20
2.4.10	Qualité de service	21
2.4.11	Capacité de communication	21
2.5	Classification des protocoles de routage dans les RCSFs	22
2.5.1	Classification suivant la structure du réseau	22
2.5.1.1	Routage plat	22
2.5.1.2	Routage hiérarchique	23
2.5.1.3	Routage géographique (basé sur la localisation)	23
2.5.2	Classification selon l'initiateur des communications	23

2.5.2.1	Initiation des communications par les nœuds sources	24
2.5.2.2	Initiation des communications par les nœuds destinations	24
2.5.3	Classification Selon le fonctionnement du protocole	24
2.5.3.1	Routage basé sur les multi-chemins	24
2.5.3.2	Routage basé sur le flux de données dans le réseau	24
2.5.3.3	Routage basé sur la négociation de données	25
2.5.3.4	Routage basé sur la qualité de service	25
2.6	Qualité de service dans les RCSFs	25
2.6.1	Définition de la qualité de service	26
2.6.2	Métriques de QoS	26
2.6.3	QoS spécifique à l'application	27
2.7	Conclusion	27
3	Routage multi-chemins dans les RCSFs	28
3.1	Introduction	28
3.2	Définition du routage multi-chemins	28
3.3	Objectifs du routage multi-chemins	29
3.3.1	Tolérance aux pannes	29
3.3.2	Partage de charge	29
3.3.3	Augmentation de la bande passante offerte à un flux	29
3.3.4	Amélioration de la QOS	30
3.4	Principes de base de la conception des protocoles de routage Multi-chemins	30
3.4.1	Découverte de routes	30
3.4.2	Fonction coût	31
3.4.3	Sélection de routes	31
3.4.4	Distribution de trafic	32
3.4.5	Maintenance de routes	32
3.5	Routage multi-chemins et la QoS	32
3.6	Classification des protocoles de routage multi-chemins	33
3.6.1	Routage basé sur une métrique simple	33
3.6.2	Routage multi-métriques	34
3.6.3	Routage basé sur la position globale	35
3.6.4	Routage basé sur la communication gérée par la station de base	36
3.7	Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins étudiés	37
3.8	Conclusion	37
4	Notre proposition :Protocole I-EASIMP	38
4.1	Introduction	38
4.2	Fonctionnement détaillé des protocoles OQoS-MRP,EASIMP et I-EASIMP.	38
4.2.1	Protocole OQoS-MRP	38
4.2.2	Protocole EASIMP	40

4.3	Protocole I-EASIMP	42
4.4	Evaluation de performances des protocoles OQoS-MRP, EASIMP,I-EASIMP	44
4.4.1	Étapes de réalisation du simulateur	44
4.4.1.1	Choix de l'environnement de simulation	44
4.4.1.2	Étapes de simulation des trois protocoles de routage	45
4.4.2	Métriques d'évaluation de performances utilisées	47
4.4.3	Paramètres de simulation	48
4.4.4	Résultats et discussions	49
4.4.4.1	Taux de livraison de paquet	49
4.4.4.2	Délai moyen de bout en bout	50
4.4.4.3	Durée de vie du réau	51
4.5	Conclusion	52
Conclusion générale et perspectives		53
Bibliographie		55
Webographie		59

TABLE DES FIGURES

1.1	Architecture de base d'un réseau de capteur sans fil [13].	4
1.2	Exemple de capteurs [6].	5
1.3	Architecture des 4 différents types de nœuds [12].	8
1.4	La portée d'un capteur [15]	9
1.5	Application des RCSFs dans la santé [19].	11
1.6	Exemple d'utilisation commerciale.	12
1.7	Utilisation des capteurs dans la domotique [23].	13
1.8	Pile protocolaire OSI [24].	14
2.1	Graphe représentatif du routage,dans un réseau de 7 nœuds.	18
2.2	Les Approches de routage dans les RCSFs.	22
3.1	Exemple de routage multi-chemins [55]	29
3.2	Types de disjonction de chemins [53].	30
3.3	Classification des protocoles de routage multi-chemins[53].	33
4.1	Diffusion du NEIDET PK.	41
4.2	Découverte de voisins	41
4.3	Exemple de fonctionnement du protocole EASIMP amélioré	44
4.4	Organigramme du protocole OQoS-MRP	45
4.5	Organigramme du protocole EASIMP	46
4.6	Organigramme du protocole I-EASIMP	46
4.7	Taux de livraison de paquet vs nombre de nœuds.	49
4.8	Délai de bout en bout vs nombre de nœuds.	50
4.9	Durée de vie du réseau vs nombre de nœuds.	51

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins étudiés	37
4.1	Table de voisins	42
4.2	Paramètres de simulations	48

LISTE DES ABRÉVIATIONS

RCSF	R éseaux de C apteurs S ans F il
ADC	A nalog to D igital C onverters
RF	R adio F réquences
GPS	G lobal P ositioning S ystem
OS	O perating S ystem
NesC	syntaxiquement proche du C
GPRS	G eneral P acket R adio S ervice
Wi-Fi	W ireless F idelity
WiMax	W orldwide I nteroperability for M icrowave A ccess
OSI	O pen S ystème I nterconnexion
MAC	(M edia A ccess C ontrol)
QOS	Q ualité de S ervice
DD	D irected D iffusionl
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy
GEAR	G eographique and E nergy A ware R outing
RR	R umor R outing
SPIN	S ensor P rotocol for I nformation N egotiation
SAR	S equential A ssignment R outing)
FPP& URF	F looding P ath P robability M etric and U nicast R etransmission F low
AOMRLM	A d-hoc O n-demand M ulti-path R outing with L ifetime M aximization
LIEMRO	L ow I nterference E nergy E fficient M ulti-path R outing P rotocol
QoSNET	Q oS N ETwork for routing protocols in large scale wireless sensor networks
RTL D	R eal T ime routing protocol with L oad D istribution in wireless sensor networks
EASIMP	E nergy A ware S ink I nitiated M ulti-path R outing P rotocol
OQoS-MRP	O ptimized Q oS-based M ultipath R outing P rotocol
I-EASIMP	I mproved E nergy A ware S ink I nitiated M ulti-path R outing P rotocol
NEIDET PK	N ieghbor D ioscovry P acket
PASTEL	P ath S election

PDR	P aquet D elivery R atio
DVR	D urée de V ie du R éseau
TLP	T aux de L ivraison de P aquet
DMBB	D élai M oyen de B out en B out
j	J oule
IHM	I nterface H omme M achine
GUI	G raphique U ser I nterfaces

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les progrès des chercheurs dans les domaines tels que l'électronique, la télécommunication ou encore la miniaturisation des composants électroniques ont donné naissance à une toute nouvelle classe de systèmes distribués à moindre coût de fabrication et de déploiement à grande échelle, plus précisément les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Ces systèmes ont la particularité d'être intimement liés aux environnements dans lesquels ils sont appelés à être déployés et ont pour mission la récolte de données environnementales de phénomènes physiques tel le degré de température, la pression, les niveaux d'eaux, l'humidité,etc.

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds dotés de capteurs, ayant la faculté de traiter les données collectées et la possibilité de communiquer entre eux à l'aide de dispositifs de communication non filaires. L'objectif étant d'acheminer les données obtenues sur le terrain vers une station de base du RCSF aussi appelé SINK qui va, à son tour, relayer les mesures reçues vers l'administrateur du RCSF.

Le défi lié aux RCSF est le fait de transmettre les informations collectées vers la station de base, de tel sorte à satisfaire certaines conditions mesurées par des métriques dites qualité de service ,en anglais Quality of service (QoS) et pour cela nous avons utiliser des protocoles de routage multi-chemins pour permettre d'obtenir des performances qu'on veut assurer, c'est ce que n'offrait pas les protocoles de routage classique (unicast) .

La QoS peut être mesurée par différents paramètres et parmi eux nous citons : Le délai de transmission, la durée de vie du réseau, le taux de livraison de paquet , le débit moyen , la fiabilité,etc.

Assurer de meilleurs performances de la QoS était l'objectif de notre travail, effectivement on a pu améliorer un protocole de routage dont la communication est initiée par la station de base et qui porte le nom de I-EASIMP(Energy Aware Sink Initiated Multi-path Routing Protocol). Ce protocole permet d'offrir le meilleur coût de transmission possible. Notre protocole qu'on a nommé I-EASIMP(Improved Energy Aware Sink Initiated Multi-path Routing Protocol) est une

amélioration du protocole EASIMP qui se base sur l'énergie résiduelle des capteurs ainsi que l'idée de base de EASIMP qui est de minimiser le délai de transmission. Le protocole I-EASIMP permet d'avoir de meilleures QoS et pour prouver cela on a comparé I-EASIMP avec deux protocoles qui sont EASIMP et OQoS-MRP. Ce dernier est aussi un protocole multi-chemins dont la communication est initié par la station de base. Les résultats de simulations ont prouvé que I-EASIMP était meilleur par rapport aux protocoles comparés et cela en termes de :

- Durée de vie du réseau.
- Taux de livraison de paquets.
- Débit moyen.

Pour exposer les travaux réalisés dans le cadre de notre projet, notre mémoire s'articule autour des quatre chapitres suivants :

-Dans le premier chapitre, nous présentons les RCSFs, leurs applications, caractéristiques, architecture et comment ils communiquent.

-Concernant le deuxième chapitre, il portera sur le routage dans les RCSFs, ses objectifs, les paramètres à prendre en considération lors de la construction d'un protocole de routage, la classifications des protocoles de routages selon certains critères, aussi le rapport de la QoS avec le routage.

-Dans le troisième chapitre, on parlera d'un type de routage qui est le routage multi-chemins, ses objectifs, son principe de conception, sa relation avec la QoS, les protocoles de routage multi-chemins et leur classification selon les critères la QoS a savoir le délai de transmission, la durée de vie du réseau, le taux de livraison de paquet , le débit moyen et la fiabilité, etc..

-Le chapitre quatre était le fruit de notre travail, car, on a pu développer un protocole de routage qu'on a nommé I-EASIMP, ce dernier est une amélioration du protocole EASIMP. Afin de réaliser ce protocole, on a d'abord fait une étude sur le fonctionnement des protocoles multi-chemins OQoS-MRP et EASIMP, cela nous a motivé à développer un meilleur protocole qui offre de meilleurs QoS, en terme des métriques citées précédemment et cela s'est montré dans la phase de simulation.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée.

En terme de domaines d'applications, les réseaux de capteurs ont connu un très grand succès, car ils détiennent un potentiel qui révolutionne de nombreux secteurs de notre économie et notre vie quotidienne, de la surveillance et la préservation de l'environnement, à la fabrication industrielle, en passant par l'automatisation dans les secteurs de transport et de la santé, la modernisation de la médecine, de l'agriculture.

Dans ce chapitre, nous allons faire un survol des RCSFs en donnant quelques définitions de base (architecture et composants d'un capteur, architecture d'un RCSFs, facteurs de conception, quelques domaines d'application, etc.).

1.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs) sont considérés comme un type spécial des réseaux Ad hoc où l'infrastructure fixe et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Ce type de réseaux consiste en un ensemble de micro-capteurs organisés aléatoirement à travers une zone géographique qui définit le terrain d'intérêt pour le phénomène capté[1].

Ils se composent généralement d'un grand nombre de capteurs communicants entre eux via des liens radio pour le partage et le traitement d'information. Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations, par exemple sur l'environnement pour construire une vue globale de

la région contrôlée, qui est rendue accessible à l'utilisateur externe par un ou plusieurs nœuds. Les données collectées par les capteurs sont acheminées directement ou à travers des autres capteurs vers une station de base. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite. [2]

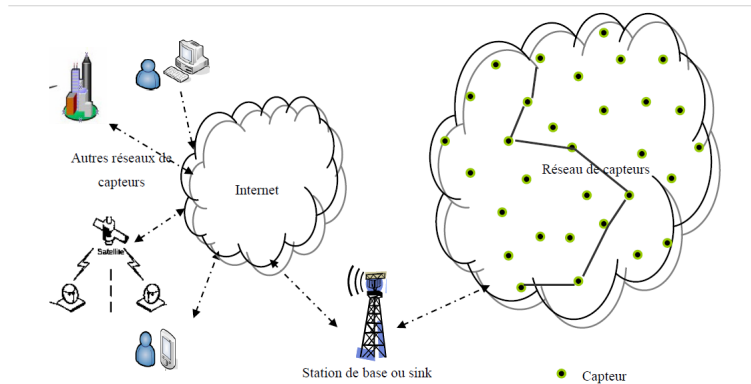


FIGURE 1.1 – Architecture de base d'un réseau de capteur sans fil [13].

1.3 Architecture et composants d'un RCSF

Dans un RCSF, on fait la distinction suivante [13] :

- **Capteur** : le composant physique qui implémente la détection de phénomène à observer ainsi que la transmission des informations captées.
- **Observateur/Application** : l'utilisateur final intéressé en l'obtention des informations concernant le phénomène observé. L'observateur envoie des requêtes au réseau et reçoit des réponses. L'utilisateur forme des requêtes sur le phénomène.
- **Phénomène** : entité observée, analysée et filtrée par le réseau et qui a un intérêt pour l'observateur. Dans le cas où le phénomène se déplace, il est recommandé d'avoir des capteurs mobiles qui peuvent être déterminés selon des contraintes de précision et de consommation des ressources.
- **Infrastructure** : influencée par les caractéristiques des capteurs et la stratégie de déploiement. Un réseau de capteurs forme un chemin entre le phénomène et l'observateur. Les protocoles dans un réseau de capteurs ont pour objectif de créer et maintenir ce chemin sous des conditions instables tout en garantissant un niveau d'énergie minimal, un temps de réponse minimal, une haute précision et une tolérance aux fautes accrue. Dans une application basée sur les capteurs, l'utilisateur est intéressé à suivre le comportement du phénomène observé sous certaines conditions de performance, précision et délai. Dans un réseau de capteurs, les capteurs collectent des mesures locales et envoient cette information aux autres capteurs et à l'observateur. Les mesures sont reliées aux précisions de chaque capteur et aussi à la localisation par rapport au phénomène étudié. La figure 1.1 montre l'architecture de base d'un RCSF.

1.4 Définition d'un capteur

Un nœud capteur est un dispositif physique de taille réduite doté d'unités lui permettant de relever, de traiter et de transmettre des informations de l'environnement dans lequel il est installé. Les capteurs sont peu coûteux, mais limités en termes de capacité (mémoire, calcul, énergie) [4]. Les capteurs sans fil sont capables de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Les progrès de la micro-électronique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût raisonnable des micro capteurs de quelques millimètres cubes de volume et qui peuvent fonctionner en réseaux [5].

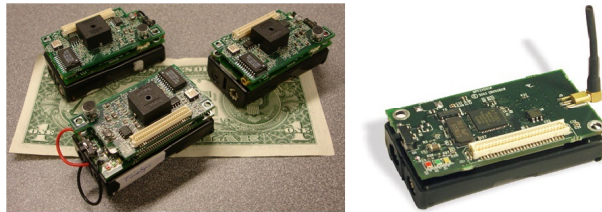


FIGURE 1.2 – Exemple de capteurs [6].

1.5 Architecture d'un capteur

L'architecture d'un capteur comprend deux parties : matériel et système d'exploitation embarqué et sont définis de la manière suivante :

1.5.1 Architecture matériel

L'architecture matérielle d'un capteur comprend quatre (04) éléments de base pour le fonctionnement du capteur : unité de détection, unité de traitement, unité d'émission /réception et unité de puissance.

D'autres éléments optionnels peuvent d'être intégrés pour certaines applications spécifiques, à savoir : un système de localisation géographique, un générateur d'énergie et un mobilisateur. Chacun de ces éléments sera détaillé dans ce qui suit [7] :

-L'unité de détection : est la composante principale d'un nœud sans fil qui se distingue de tout autre système embarqué avec ces capacités de communication. L'unité de détection peut inclure généralement plusieurs sondes, qui fournissent des informations collectées du monde physique. Chaque unité est responsable de collecter des informations d'un certain type, telles que la température, l'humidité, ou la lumière. Elle se compose habituellement de deux sous-unités :

Une sonde et un convertisseur analogique-numérique(en anglais ADC :Analog to Digital Converters). Les signaux analogiques produits par la sonde, basés sur l'observation du phénomène, sont convertis en signaux numériques par le (ADC) puis introduits dans l'unité de traitement.

-L'unité de traitement : l'unité de traitement est le contrôleur principal du nœud sans fil. Elle se compose d'une mémoire à bord ou peut être associée à une petite unité de stockage intégrée sur la carte intégrée. L'unité de traitement contrôle les procédures qui permettent au nœud d'exécuter des opérations de détection, des algorithmes associés et de collaborer avec les autres nœuds par la communication sans fil.

-L'unité d'émission/réception : la communication entre deux nœuds sans fil quelconques est exécutée par l'unité émetteur/récepteur. Une unité d'émetteur/récepteur met en application les procédures nécessaires pour convertir les bits à transmettre dans des ondes radiofréquences (RF) pour qu'ils soient récupérés correctement à l'autre extrémité. Essentiellement, le RCSF est relié en réseau grâce à cette unité.

-L'unité de puissance : un des composants les plus importants d'un nœud sans fil est l'unité de puissance. Habituellement, l'alimentation par batterie est utilisée, mais d'autres sources d'énergie sont également possible (énergie solaire). Chaque composant dans le nœud sans fil est actionné par l'unité de puissance, et la capacité limitée de cette unité exige un fonctionnement et rendement optimum pour les tâches effectuées par chaque composant.

-Le système de localisation géographique : dans plusieurs applications des RCSFs, les tâches de détection et les techniques de routage ont besoin de connaître la localisation géographique d'un nœud. Ainsi, il est commun pour qu'un nœud soit équipé d'un système de localisation géographique. Ce système peut se composer d'un module de GPS(en anglais Global Positioning System) pour un nœud de haut niveau ou bien d'un module de software qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent des informations sur l'emplacement du nœud par des calculs distribués.

-Le mobilisateur : un mobilisateur peut parfois être nécessaire pour déplacer un nœud pour accomplir ses tâches. Le support de mobilité exige des ressources énergétiques étendues qui devraient être fournies efficacement. Le mobilisateur peut, également, opérer dans étroite interaction avec l'unité de détection et le processeur pour contrôler les mouvements du nœud.

-Le générateur de l'énergie : tandis que l'alimentation par batterie, est la plupart du temps, utilisée dans les nœuds, un générateur électrique supplémentaire peut être utilisé pour des applications ou une plus longue vie de réseau est essentielle. Pour des applications extérieures, des piles solaires sont utilisées pour générer une alimentation électrique. De même, des techniques de récupération d'énergie pour l'énergie thermique ou cinétique peuvent également être utilisées.

1.5.2 Système d'exploitation

Le système d'exploitation (en anglais Operating System 'OS') n'est qu'un ensemble de programmes responsables d'assurer l'exploitation des ressources matérielles d'un dispositif par les applications utilisatrices. Les OSs destinés aux réseaux de capteurs sont de petite taille, vue l'espace physiquement limité, mais ils doivent présenter plus de performances en termes de temps d'exécution, occupation de mémoire et en gestion d'énergie. Comme exemple de système d'exploitation le plus répandu pour les réseaux de capteurs : Tiny OS.

1.5.2.1 Tiny OS

Tiny OS est un système d'exploitation open-source conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il a été développé à l'Université de Berkeley [9, 10].

Tiny OS respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place (quelques kilo-octets). Cela s'inscrit avec l'utilisation du langage de programmation NesC (syntaxiquement proche du C) [11].

Sa bibliothèque de composant est particulièrement complète puisqu'elle inclut des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. Ces composants peuvent être utilisés tels qu'ils sont, comme ils peuvent être aussi adaptés à des applications précises. En s'appuyant sur un fonctionnement événementiel, Tiny OS propose une gestion très précise de la consommation d'énergie du capteur et permet une meilleure adaptation à la communication sans fil [10].

1.6 Modèle de nœuds

Selon l'application et la structure choisie, un RCSF peut contenir différents types de nœuds [12].

- **Un nœud régulier** est un nœud d'une unité de transmission et d'une unité de traitement de données.
- **Un nœud capteur** ou nœud source est un nœud régulier équipé d'une unité d'acquisition ou de détection.
- **Un nœud actionneur** ou robot est un nœud régulier doté d'une unité lui permettant d'exécuter certaines tâches spécifiques comme des tâches mécaniques (se déplacer, combattre un incendie, piloter un automate, etc.)
- **Un nœud station de base** est un nœud régulier doté d'un convertisseur série connecté à une seconde unité de communication (GPRS¹, Wi-Fi², WiMax³, etc.). La seconde unité de communication fournit une retransmission transparente des données provenant de nœuds capteurs à un utilisateur final ou d'autres réseaux comme internet.
- **Un nœud passerelle** ou Gateway est un nœud régulier permettant de relayer le trafic dans le réseau sur le même canal de communication.

1. General Packet Radio Service

2. Wireless Fidelity

3. Worldwide Interoperability for Microwave Access

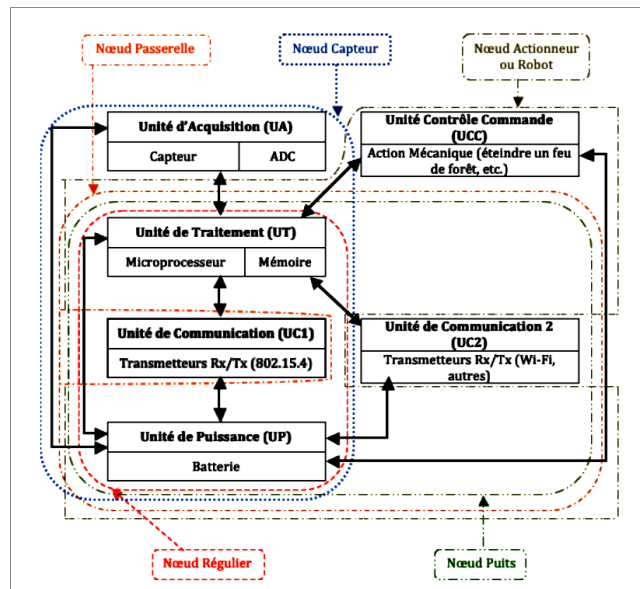


FIGURE 1.3 – Architecture des 4 différents types de nœuds [12].

1.7 Caractéristiques d'un RCSF

Il existe de multitudes de caractéristiques dans les RCSFs et parmi elles on pourra noter les caractéristiques suivantes [14,1] :

1.7.1 Contrainte d'énergie

Cette contrainte est très importantes, car les capteurs sont généralement déployés sur des zones inaccessibles difficile d'accès, voir même isolés, ce qui rends presque impossible le remplacement de leurs batteries qui servent d'alimentation aux capteurs, c'est pour cela que la consommation d'énergie au niveau des capteurs devrais être prise au sérieux pour augmenter la durée de vie des réseaux.

1.7.2 Forte densité

Un réseau de capteurs est constitué d'un ensemble de capteurs. Cet ensemble pourrait se constituer de centaines allant à des milliers de capteurs qui forment le réseau, c'est ce qui offre une densité très importante au réseau.

1.7.3 Mobilité

La mobilité devient primordiale pour certains types de réseaux de capteurs. Par exemple, dans des applications de commande de taxi via Smartphone où les capteurs sont embarqués dans les smartphone du chauffeur qui est sensé être dans la voiture, le chauffeur à son tour parcourt des distances et change d'endroit. D'une seconde à une autre, ces capteurs servent du GPS afin de

permettre au client de voir les taxis les plus proches et qui sont disponibles pour une course mais aussi aider le chauffeur à trouver ses clients.

1.7.4 Couverture limitée

Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud obtient une certaine vue locale de l'environnement qui est limitée par sa portée (voir la figure Figure 1.5). La couverture d'une vaste surface est composée de l'union de nombreuses couvertures de petite taille assurée par ces nœuds.

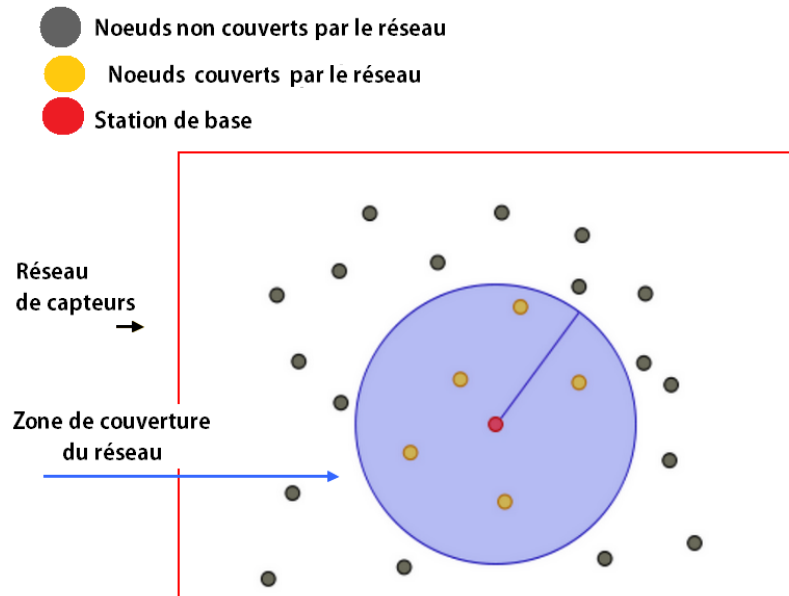


FIGURE 1.4 – La portée d'un capteur .[15]

1.7.5 Fiabilité

La fiabilité c'est le fait de recevoir par la station de base des données en provenance des capteurs tel qu'ils sont envoyé (sans erreurs) et n'ayant pas subis d'altérations au cours de leurs envoi ou n'pour assurer le bon fonctionnement du RCSF.

1.7.6 Débit

Le Débit est la quantité moyenne de données (mesuré en bits) transportée par unité de temps (sec) l'unité de mesure est Bits /Seconde, Le débit est un paramètre très important dans les RCSFs, vu qu'un retard l'hors de la transmission de données pourrais faussé les résultats envoyé par le capteur à la station de base.

Les communications radio peuvent atteindre jusqu'à 20 Mb/s tandis que le Bluetooth pourrais atteindre 3Mb/s jusqu'à 10Mb/s ce qui pourrais nous donné une idée sur le choix de la technologie de transmission a utilisé de notre réseau [16,17].

1.7.7 Ressources limitées

Les capteurs sont des objets communicants à taille très réduite, ce qui limite leurs ressources en termes de mémoire disponible, puissance de traitement, bande passante et particulièrement en quantité d'énergie embarquée (ce qui a été déjà cité dans le début de la section) .

1.7.8 Sécurité physique limitée

En effet, l'absence des fils dans la transmission de données peut causer un problème car il est facile de brouiller et d'intercepter les données captées par les capteurs à cause des ondes radio émises par les capteurs lors de la transmission de données [18].

1.8 Domaine d'applications

Les réseaux de capteurs sont connus pour leurs déploiement dans divers domaines afin d'apporter des solutions efficaces et parmi ces domaines nous citons :

1.8.1 Applications militaires

Elle est considéré comme la première et la plus importante application du domaine des RCSFs. En effet la première utilisation a été réalisé pour des applications militaires. Les nœuds capteur devraient fournir les services suivants [19] :

- Surveillance du champ de bataille
- Reconnaissance des forces d'opposition
- Repérage des cibles
- Évaluation des dommages de la bataille
- Détection et reconnaissance d'attaque nucléaire, biologique et chimique.

1.8.2 Applications de santé

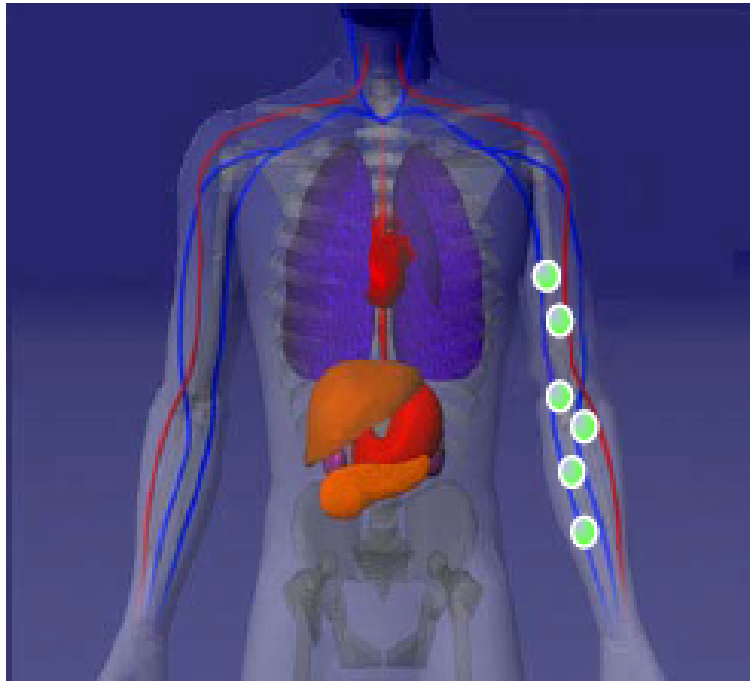


FIGURE 1.5 – Application des RCSFs dans la santé [19].

On pourrait imaginer que dans le futur, la surveillance des fonctions vitales de l'être humain serait possible grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Actuellement, des micro-caméras qui peuvent être avalées existent. Elles sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures. Les auteurs d'une récente étude, présentent des capteurs qui fonctionnent à l'intérieur du corps humain pour traiter certains types de maladies. Leur projet actuel est de créer une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue.

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

1.8.3 Applications commerciales

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

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

Pour titre d'exemple, on vous met ci-dessous un coli commander sur le géant du e-commerce mondial ALIEXPRESS, il s'agit d'un coli reçu de chine qui a été acheté via le site www.aliexpress.com, les captures d'écrans déterminent les positions du coli de l'envoi jusqu'à la réception et la confirmation de l'arrivée de colis, on peut dire que ces capteurs sont utiles car on a pu confirmer que la commande a bien été reçue.

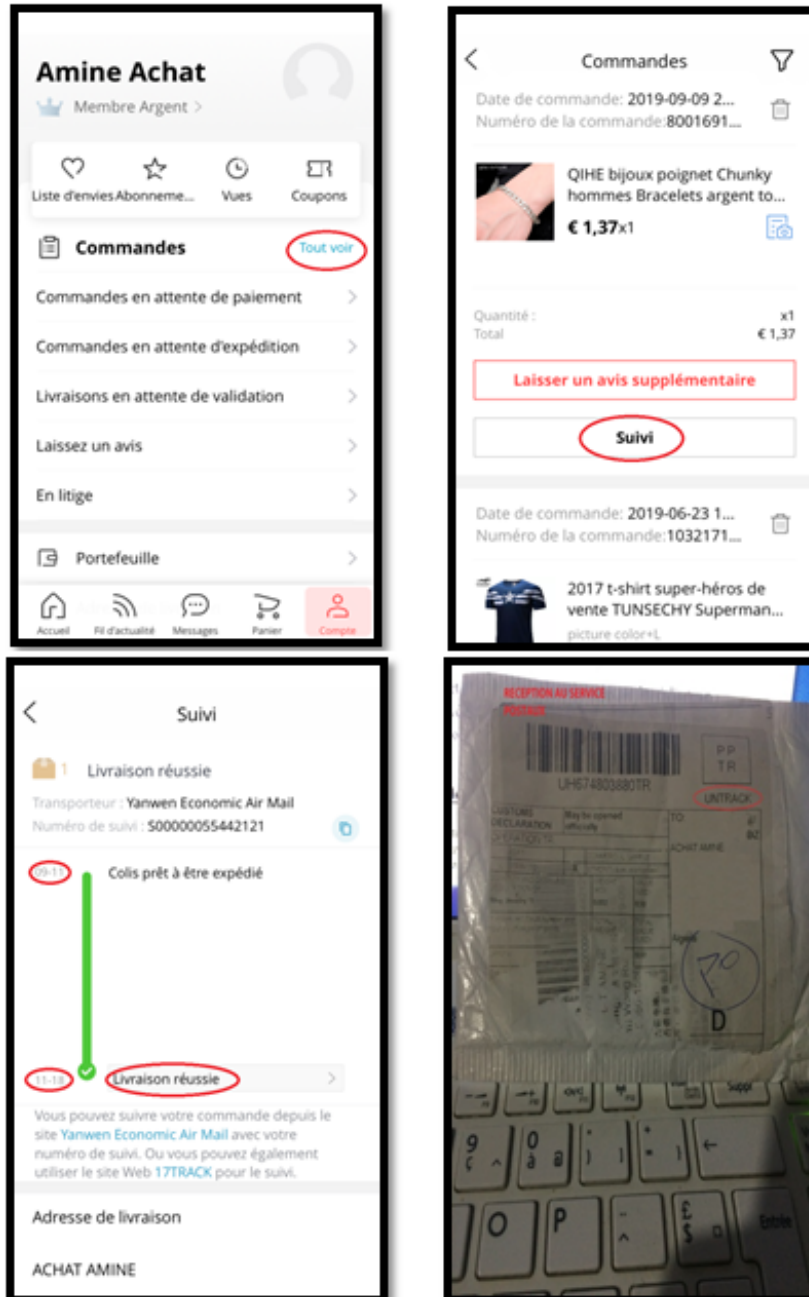


FIGURE 1.6 – Exemple d'utilisation commerciale.

1.8.4 Supervision des structures et des phénomènes sismiques

Une autre classe d'applications pour les RCSFs concerne le suivi de l'état des structures civiles. Ces structures peuvent être des bâtiments, des ponts et des routes.

À l'heure actuelle, la sûreté de ces structures est principalement apportée par le biais d'inspections manuelles ou visuelles ou occasionnellement par des technologies onéreuses en temps et en argent, telles que les rayons X et les ultrasons. Des techniques de détection réseau permettent d'automatiser le processus, en fournissant en temps opportun de riches informations sur un début de fissure ou d'autres dommages structuraux [20].

1.8.5 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 [21].

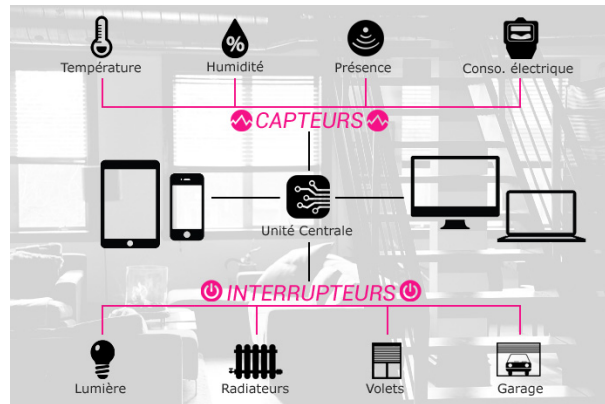


FIGURE 1.7 – Utilisation des capteurs dans la domotique [23].

1.9 La communication dans les réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds doivent bien réagir avec l'environnement où ils sont placés. Ainsi, ils doivent permettre une communication multi sauts pour les données qui circulent dans la zone de capture. Pour cela, un modèle de communication est proposé par Ian et al dans [14] dont le rôle principal est la standardisation de la communication entre les participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles

pour assurer ce qu'on peut appeler l'interopérabilité.

Ce modèle combine l'énergie et le routage, intègre les données avec les protocoles réseaux et permet une communication efficace entre les différents nœuds à travers un medium non filaire.

1.9.1 Pile protocolaire

Par analogie au modèle OSI (Open Système Interconnexion) des réseaux filaires, le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI.

Comme la communication n'est pas le seul souci dans les réseaux de capteurs, il y a d'autres critères très importants qu'il faut en tenir compte tel que la contrainte d'énergie. De ce fait, d'autres couches supplémentaires sont ajoutées pour gérer l'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches.

Le rôle et les caractéristiques des couches : application, transport, réseaux, liaison de données, physique et les niveaux intégrés : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche (voir la figure 9) sont résumés dans le paragraphe suivant [23].

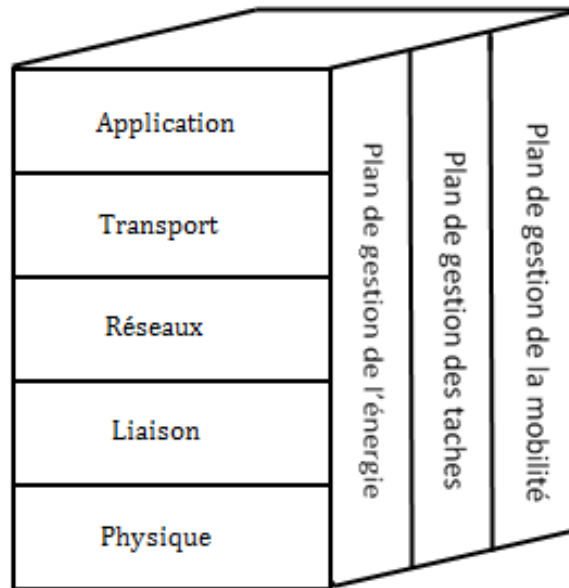


FIGURE 1.8 – Pile protocolaire OSI [24].

1.9.1.1 Couche application

Dépendamment des fonctionnalités fournies par les capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et implémentées sur cette couche. Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues [25].

1.9.1.2 Couche transport

Cette couche constitue une interface entre la couche application et la couche réseau. Elle est responsable : du transport de données, leur découpage en paquets, contrôle de flux, conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission afin d'assurer le bon acheminement des données et d'éviter les redondances [25].

1.9.1.3 Couche réseau

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont dispersés à forte densité pour observer un phénomène dans une localité . Par conséquent, ils sont très proches les uns des autres. Pour assurer la propagation du signal sans effets de dégradation, les réseaux de capteurs utilisent une communication multi sauts. De plus, les nœuds doivent consommer moins d'énergie pour acheminer les données capturées dans le réseau au nœud puits, ce qui rend l'utilisation des protocoles de communication traditionnels des réseaux Ad hoc impraticables. Par ailleurs, d'autres caractéristiques peuvent être citées [26] afin d'illustrer le besoin de nouveaux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs :

- Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global vu le grand nombre de nœuds capteurs.
- Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées par de multiples sources à un nœud puits particulier.
- Les multiples capteurs peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance des données captées due à la forte densité de déploiement).
- Les capteurs exigent une gestion soignée des ressources disponibles à savoir : la Puissance de transmission, énergie de la batterie, ainsi que la puissance de traitement et stockage.

1.9.1.4 Couche liaison de données

La couche liaison est à la charge du multiplexage de données, détection des trames, la gestion de l'accès au support de communication et le contrôle d'erreurs. Elle assure la fiabilité de la communication point à point et multipoint. Cependant, les protocoles MAC(Media Access Control) conventionnels ne sont pas directement applicables dans les réseaux de capteurs. Cette couche exige l'utilisation de protocoles qui doivent être capables de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins et de minimiser les retransmissions[25].

1.9.1.5 Couche physique

Dans cette couche,les besoins d'une modulation simple et robuste à motivé l'utilisation des techniques de transmission et de réception de données afin d'assurer la sélection des fréquences, la génération des porteuses et le cryptage des différentes données afin d'en assurer la confidentialité [14]. De manière générale, le choix d'un bon schéma de modulation est critique et dépend du système utilisé.

1.9.2 Niveaux intégrés dans la pile protocolaire

On pourra remarquer que trois couches supplémentaires ont été ajoutées au modèle de communication proposé et dans l'utilité est résumée dans ce qui suit :

1.9.2.1 Plan de gestion d'énergie

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie qui alimente les capteurs. Dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués et de la même manière éviter une perte d'énergie inutile. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [27].

Dès qu'un nœud tombe en panne un algorithme de routage intervient pour faire passer les données aux nœuds désirés tout en évitant que le réseau soit hors service. Ce type de protocole tend à satisfaire certains métriques de la QoS que nous allons détailler dans le prochain chapitre.

1.9.2.2 Plan de gestion de mobilité

Il permet la détection et l'enregistrement des mouvements des nœuds capteurs afin de maintenir des informations sur leurs positions géographiques et d'entretenir continuellement une route vers l'utilisateur final.

Dans plusieurs cas les nœuds capteurs peuvent être mobiles suite à une configuration d'une nouvelle topologie ou bien par un changement d'emplacement voulu par l'utilisateur. Le système de gestion de mobilité doit être capable de commander les nœuds pour réaliser les mouvements nécessaires [14].

1.9.2.3 Plan de gestion de tâche

Il ordonne et balance les différentes tâches de capture de données dans une région spécifique. Les nœuds de cette région peuvent effectuer cette tâche en décalage par rapport aux autres ; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur Niveau de batterie [14].

1.10 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. La flexibilité, la tolérance aux fautes, le prix réduit et les caractéristiques rapides de déploiement des réseaux de capteurs offrent des possibilités infinies de développement dans tous les domaines d'application. Nous avons essayé à travers ce chapitre de donner une étude générale des réseaux de capteurs (architecture des RCSFs, topologies, etc.) ainsi que leurs domaines d'application.

Dans le chapitre suivant nous allons nous intéresser aux problèmes liés aux RCSFs, en présentant la notion de routage.

2.1 Introduction

Dans les RCSFs, les capteurs collaborer en communiquant entre eux pour faire parvenir les informations captées à la station de base d'une façon fiable et dépendante des objectifs qu'on veut assurer comme par exemple le temps que met le paquet pour atteindre la station de base qui est appelé délais de bout en bout. Cette opération est défini par le routage. Ce dernier est assuré par des algorithmes qui peuvent varier d'un réseau à un autre.

Ce chapitre est donc consacré à la notion de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous allons commencer par la définition du routage, ses objectifs, ensuite nous allons nous intéressés à comment concevoir un algorithme de routage et leurs classifications, et à la fin de ce chapitre nous allons consacrer une partie pour l'élément clé des algorithmes de routage qui est la qualité de service.

2.2 Définition du routage

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. Sa performance est importante dans les réseaux où l'information n'est pas distribuée par une seule source, mais échangée entre des agents indépendants [28].

Exemple :

Si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure suivante est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entres les deux stations.

-Pour comprendre c'est quoi le routage, c'est simple, on suppose qu'on a 7 nœuds qui sont reliées

par des arcs qui représentent les routes possibles comme nous le montre la figure ci-dessous :

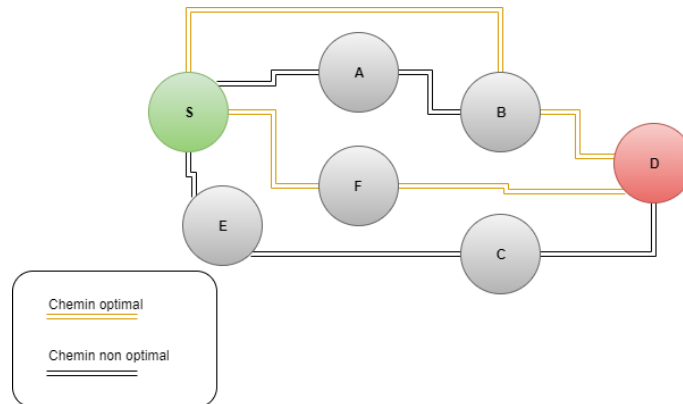


FIGURE 2.1 – Graphe représentatif du routage, dans un réseau de 7 nœuds.

Notre objectif est d'atteindre le point D en partant du Point S en optimisant la distance (le plus court chemin) afin que la communication soit optimale entre S et D, on suppose que tous les arcs qui relient deux entités sont égaux.

La route optimale entre S et D serait donc celle qui cumule le moins d'arcs en ayant comme départ le point S pour arriver au point D.

2.3 Objectifs du routage

L'utilisation de protocoles de routage pour relier les nœuds entre eux en utilisant des stratégies et règles optimales de routage pour faire fonctionner notre réseau d'une manière à ne pas avoir des problèmes (pannes d'équipements, extensions temporaires du réseau) et à l'évolution de la demande (mobilité des utilisateurs ou variabilité des applications). Ces règles ont pour objectifs [29] :

-Minimisation de la charge du réseau

Les algorithmes utilisant de multiples chemins peuvent minimiser la charge du réseau. En effet un chemin peut être saturé à un moment ce qui pourra provoquer une surcharge du réseau.

-Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables

Le fait que les chemins utilisés pour router les paquets de données puissent évoluer, ne doit pas avoir d'incident sur le bon acheminement des données. L'élimination d'un lien, par cause de panne ou par cause de mobilité devrait, idéalement, augmenter le moins possible les temps de latence.

-Assurer un routage optimal

L'architecture des RCSFs, lorsqu'elle utilise des équipements nombreux, contourne ce problème c'est à dire l'accès s'établit de proche en proche, via les autres membres du réseau qui font office de relais. Si la construction des chemins optimaux est un problème dur, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, on doit assurer une maintenance de routes sans coût

supplémentaire.

-Le temps de latence

À chaque passage de relais, les informations accusent un léger décalage temporel, ce qui augmente la durée de transmission, c'est à dire le temps de latence.

2.4 Considérations de conception d'un protocole de routage dans les RCSFs

Dans cette section, nous présentons un certain nombre de considérations qui sont indispensables pour la conception d'un protocole de routage pour les RCSFs.

2.4.1 Déploiement des nœuds

Les réseaux de capteurs peuvent être installés d'une manière déterministe ou auto-organisée. Une fois le déploiement du réseau est déterministe, les nœuds sont placés manuellement d'une manière prédéterminée. Le routage pourrait suivre les chemins prédéterminés mais ce n'est pas toujours le cas [30].

2.4.2 Consommation d'énergie

La durée de vie d'un nœud capteur a une forte dépendance avec la durée de vie de la batterie [31].

Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud joue un rôle dual comme un expéditeur et un routeur de données. Le mal-fonctionnement de quelques nœuds capteurs dû à la défaillance (à cause de la diminution totale d'énergie) peut causer les changements topologiques cruciaux et peut exiger le déplacement des paquets ainsi que la réorganisation du réseau [32].

2.4.3 Modèle de délivrance des données

Le modèle de renvoi des données captées constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Le modèle de délivrance des données peut être classé dans l'une de ces catégories : périodique (time-driven), événementiel (event-driven), orienté requête (query-driven) et hybride [33,32] .

2.4.4 Tolérance aux pannes

La défaillance des nœuds capteurs ne devrait pas affecter la globalité du réseau de capteurs. Si plusieurs nœuds sont en panne, les protocoles de routage doivent s'adapter à la formation de nouveaux liens et router les données collectées à la station de base[34].

2.4.5 Scalabilité

N'importe quel schéma de routage doit pouvoir travailler avec le nombre énorme de nœuds de capteurs. En outre, les protocoles de routage doivent être assez scalables pour répondre aux événements dans l'environnement. Jusqu'à ce qu'un événement se produise, la plupart des capteurs peuvent rester dans l'état de sommeil avec quelques capteurs restants qui fournissent des données d'une qualité brute [32].

2.4.6 Dynamisme du réseau

Les réseaux de capteurs peuvent être classifiés comme dynamiques ou statiques. Dans les réseaux de capteurs statiques, les composants demeurent stationnaires. C'est habituellement le cas dans la plupart des réseaux de capteurs, par exemple un réseau de capteurs pour surveiller la température ou l'humidité d'une salle ou bien d'une région. Dans les réseaux de capteurs dynamiques, au moins l'un des composants est mobile[35].

2.4.7 Media de transmission

Dans un réseau de capteurs multi-sauts, les nœuds communicants sont liés par des liens sans fil. Les problèmes classiques liés au canal sans fil (par exemple : effacement, taux d'erreur élevé, etc.) peuvent également affecter le fonctionnement du réseau de capteurs. En général, la largeur de bande passante requise pour la transmission des données est basse, de l'ordre de 1-100kb/s. Les médias de transmission sont liés à la conception de la couche MAC [36].

2.4.8 Connectivité

La densité élevée des nœuds dans les réseaux de capteurs exclut complètement l'isolement entre eux. Par conséquent, on s'attend à ce que des nœuds capteurs soient fortement reliés. Ceci, peut ne pas empêcher la topologie du réseau d'être variable et la taille du réseau d'être craintive aux échecs des nœuds capteurs. En outre, la connectivité dépend probablement de la distribution aléatoire des nœuds [32].

2.4.9 Couverture

Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud capteur obtient une certaine vue de l'environnement. La vue de l'environnement d'un capteur donné est limitée dans la portée et dans l'exactitude, elle peut seulement couvrir un domaine physique limité de l'environnement. Par conséquent, la couverture d'une région est également un paramètre important dans la conception d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs [32].

2.4.10 Qualité de service

Dans quelques applications, les données devraient être fournies au cours de certaine période du moment où elles sont captées, sinon ils sont inutiles, et par conséquent, la latence définie pour la livraison des données est une autre condition pour les applications qui sont soumises sous des contraintes du temps. Cependant, dans plusieurs applications, la conservation d'énergie, qui est directement liée à la durée de vie du réseau est considérée relativement plus importante que la qualité des données envoyées. Pendant que l'énergie s'épuise, le réseau exige de réduire la qualité des résultats afin de réduire la diminution d'énergie dans les nœuds, et par conséquent augmenter la durée de vie du réseau [32].

La qualité de service est l'un des éléments les plus importants dans notre travail et c'est grâce à elle qu'on pourrait juger les performances des algorithmes de routage .

2.4.11 Capacité de communication

Les nœuds dans un réseau de capteurs ne sont pas nécessairement identiques. Ils peuvent être équipés de différents capteurs, et avoir des caractéristiques différentes. Ces particularités doivent être prises en considération pendant la conception d'un protocole de routage [37].

2.5 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs

Dans un réseau de capteurs, 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 sont nécessaires entre les nœuds.

Pour les RCSFs, plusieurs classifications de routage ont été proposées. Al-Karaki et Al [38] ont proposé une classification (la plus citée) à ces différents protocoles. Ces derniers sont classés selon leurs principes de fonctionnement, la structure du réseau et l'initiateur de communication.

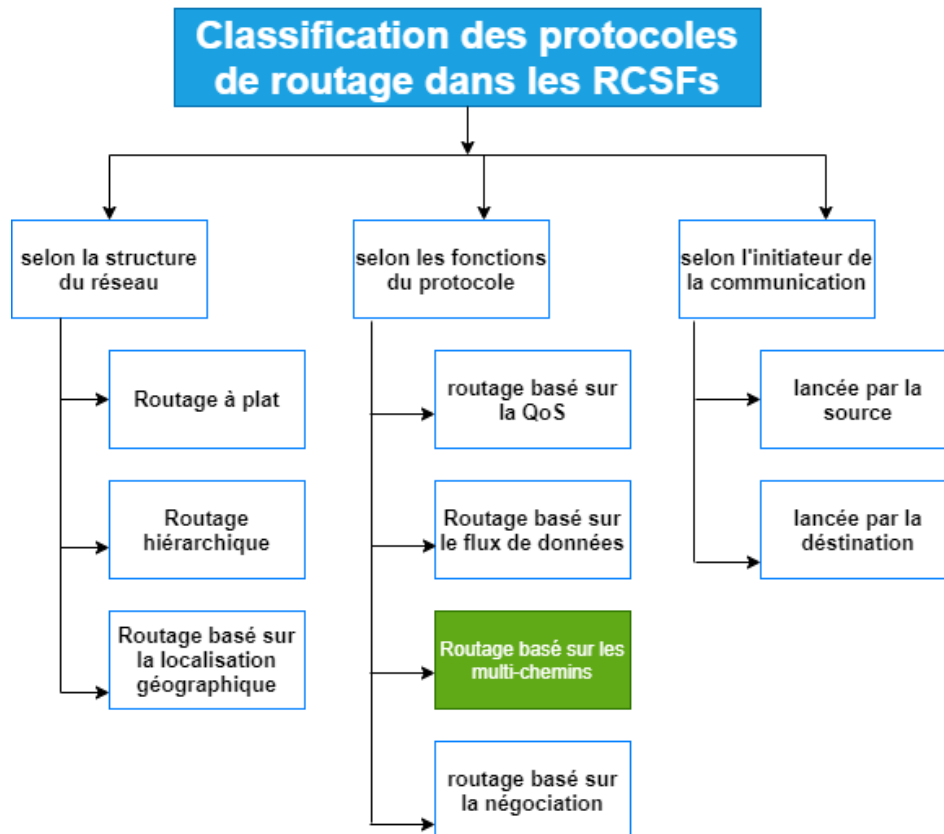


FIGURE 2.2 – Les Approches de routage dans les RCSFs.

2.5.1 Classification suivant la structure du réseau

Il y a trois architectures réseaux à la base : plate, hiérarchique et géographique :

2.5.1.1 Routage plat

Une première classe de protocoles de routage regroupe les protocoles conçus pour des réseaux de capteurs sans fil où l'architecture réseau est plate, tous les nœuds sont au même niveau. Une architecture réseau plate possède beaucoup d'avantages : le coût réduit de maintenance de l'architecture réseau, la possibilité de découvrir plusieurs routes entre les capteurs. Les nœuds

à proximité de la station de base participent au routage plus que les autres puisque tous les messages sont destinés à la station de base [39].

- **Exemple : DD (Directed Diffusion)[40]**

2.5.1.2 Routage hiérarchique

Dans cette architecture il y a la notion de cluster : le réseau est subdivisé en clusters et chaque cluster est constitué de nœuds simples et d'un nœud leader . Seul le cluster-Head (appelé aussi nœud leader ou encore nœud chef) communique avec les autres nœuds ou avec la station de base. Tous les nœuds d'un cluster envoient les données au cluster-Head .

Les avantages de cette classe c'est qu'elle assure les deux critères de la QoS a savoir la scalabilité et la consommation efficace de l'énergie. Les nœuds leader sont soit des super nœuds (des nœuds plus puissants comparés aux nœuds simples [39]).

- **Exemple : LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[41]**

2.5.1.3 Routage géographique (basé sur la localisation)

La localisation des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite en utilisant GPS (Global Positioning System). Dans la plupart des protocoles de routage, l'information sur la localisation des nœuds est nécessaire afin de calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée.

L'avantages de routage géographique est l'utilisation des GPSs qui permet d'améliorer la connaissance de la position, et aussi permet d'améliorer la perception de positionnement (résolution de la distance) grâce à des traitements de signal dans des récepteurs.

Le principal inconvénient de ce routage est que les capteurs doivent être équipé d'un système GPS et qui ne fonctionne pas en son absence [42].

- **Exemple : GEAR (Geographique and Energy Aware Routing)[43]**

2.5.2 Classification selon l'initiateur des communications

La communication dans un réseau de capteurs peut être initiée par un nœud source ou un nœud destination.

2.5.2.1 Initiation des communications par les nœuds sources

Dans un protocole où la communication est initiée par un nœud source : les nœuds envoient des données à la station de base quand ils détectent une variation sensible des paramètres à surveiller, ces protocoles utilisent des modèles de livraison de données dirigées par les événements ou dirigés par le temps (périodiques). Soit la donnée est envoyée a intervalle de temps régulier ou alors elle est envoyée quand les nœuds capturent une certaine valeur (détection d'un évènement) [44].

- **Exemple : DD (Directed Diffusion)[40]**

2.5.2.2 Initiation des communications par les nœuds destinations

Les protocoles où la communication est initiée par les destinations, utilisent un modèle de livraison de données basé sur les requêtes. Les nœuds sources répondent aux requêtes envoyées par la station de base. Il y'a un sur coût dans ce type de protocoles puisque les requêtes sont d'abord diffusées dans tout le réseau. Donc, à chaque fois qu'il ya une requête il y a un flooding de tout le réseau (inondation de tout le réseau) [44].

- **Exemple : GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)[43]**

2.5.3 Classification Selon le fonctionnement du protocole

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Quality of Service "QoS" based routing), routage basé sur les requêtes (query-based routing), routage basé sur des multichemins (Multi-path based routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing)[45][46].

2.5.3.1 Routage basé sur les multi-chemins

Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La fiabilité d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Pour cette raison, certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants [45] [46].

- **Exemple : DD (Directed Diffusion)**

2.5.3.2 Routage basé sur le flux de données dans le réseau

Dans cette approche, la phase d'établissement de la route est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds. Les

avantages de ce routage est l'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs et aussi la durée de vie du réseau est représentée comme une fonction générale de tous les nœuds dont l'objectif est de maximiser les durées de vie élémentaires des capteurs ainsi que la capacité du réseau.

Par contre cette approche est valable pour les RCSFs à des topologies spécifiques (par exemple : un seul nœud origine) [42]

- **Exemple : RR (Rumor Routing)[47]**

2.5.3.3 Routage basé sur la négociation de données

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent déjà de la donnée à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données [45][46].

- **Exemple : SPIN (Sensor Protocol for Information Negotiation)[48].**

2.5.3.4 Routage basé sur la qualité de service

Dans les protocoles de routage basés sur la QoS, le réseau doit équilibrer la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, retard, énergie, largeur de bande passante, etc. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications de surveillance (centres nucléaires, monitoring médical, applications militaires, etc) [45][46].

- **Exemple : SAR (Sequential Assignment Routing)[49]**

2.6 Qualité de service dans les RCSFs

Dans certaines applications du domaine des réseaux de capteurs sans fil, la notion du temps devrait être respectée sinon un retardement causera des problèmes dans le fonctionnement du réseau, c'est pour cela qu'une norme dite qualité de service a été introduite afin de bien garantir l'acheminement des informations en prenant compte plusieurs paramètres c'est ce que nous allons explorer ci après.

2.6.1 Définition de la qualité de service

Il n'ya pas de définition en général pour la QoS cependant on pourra la définir de différentes manières dépendamment du domaine applicatif [50]. Par exemple, dans les applications impliquant la détection et la poursuite de cibles, beaucoup de facteurs peuvent contribuer à l'échec dans la détection ou l'erreur dans la poursuite. Ceci peut être dû au déploiement et à la gestion du réseau, c'est-à-dire l'endroit où l'événement se produit ne peut être couvert par aucun nœud capteur actif. Intuitivement, nous pouvons définir la couverture ou le nombre de capteurs actifs comme paramètres de mesure de la QoS. En outre, l'échec peut être provoqué par la fonctionnalité limitée des nœuds capteurs. Par exemple, l'exactitude d'observation inadéquate ou un taux de reportage faible des nœuds. De ce fait, on peut définir les erreurs d'exactitude ou de mesure d'observation comme paramètres de mesure de la QoS. De plus, cette dernière peut être induite par la perte de l'information lors de son routage. Il est aussi possible de définir quelques paramètres de transport de l'information pour mesurer la QoS. Cependant, la séparation dans la définition des paramètres de mesure de la QoS n'est pas absolue puisqu'une seule application, telle que la mesure de performance liée à la détection d'événements, peut impliquer tous ces paramètres, ces derniers sont aussi appelé métriques de la QoS et ce sera le prochain point que nous allons éclaircir.

2.6.2 Métriques de QoS

Les facteurs entrant en jeu pour mesurer la QoS dans les RSCFs sont nommés métriques de la QoS et ils permettent de mesurer la qualité de l'algorithme de routage utilisé. Parmi les métriques existantes, on notera celles qui sont les plus communes aux différents algorithmes et qui sont détaillés dans ce qui suit :

- **Consommation d'énergie**

Le but principal de l'implémentation d'un nouveau protocole pour les réseaux de capteurs est la minimisation de la consommation d'énergie qui est un facteur déterminant pour la durée de vie du réseau. Car, comme on le sait un capteur sans énergie entrainera à une panne du réseau. Nous pouvons prendre comme critère l'énergie moyenne consommée par chaque nœud du réseau.

- **Délai de bout en bout**

Appelé aussi temps de latence, cette métrique est vraiment à prendre au sérieux, par exemple dans la détection de fuites de gaz chimiques dans une usine ou dans une maison domestique, il est primordial d'obtenir l'information en un temps records afin de prendre les mesures nécessaires pour régler cet incident.

La métrique du délai de bout en bout mesure le temps moyen nécessaire à une donnée pour qu'elle soit acheminée à partir du nœud source jusqu'au nœud dit destinataire.

- **Taux de fiabilité**

C'est le rapport entre le nombre de données distinctes reçues par le nœud destination et le nombre de données envoyées par la source on pourra retrouver quelques appellations aussi tel que

PDR (paquet delivery ratio) [51] . Par exemple, un protocole de routage pour les réseaux de capteurs doit minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis un nœud capteur vers le nœud puits, car l'information transférée peut être très importante , on pourra prendre un capteur qui mesure la distance alors si ce capteur n'envoie pas toutes les distances mesurées on aura cependant un capteur non crédible.

- **La gigue**

C'est la différence de latence entre les paquets(certains vont très vite,d'autres plus lentement)[50].

2.6.3 QoS spécifique à l'application

Comme on l'a déjà cité auparavant, une QoS est spécifique à chaque application. On considère des paramètres de QoS tels que la couverture, les erreurs de mesure, et le nombre optimum des nœuds capteurs actifs [52]. En résumé, les applications imposent des conditions spécifiques au déploiement des nœuds capteurs, le nombre de nœuds actifs, la précision de mesure des nœuds, etc., qui sont directement liées à la qualité des applications[50].

2.7 Conclusion

On a vu dans ce chapitre le routage en détail ainsi que ses axes les plus important, selon l'objectif des RCSFs qu'on veut réaliser, les algorithmes différent mais ce qui est le plus important c'est d'assurer le maintien du service du réseau, car si le réseau tombe en panne on ne pourra pas exploiter les données des capteurs.

Pour assurer le fonctionnement du RCSFs on pourra choisir des algorithmes dit multi-chemins. Ces algorithmes à chemins différents peuvent d'une façon efficace maintenir le réseau en service en cas de panne d'une route. Le chapitre suivant se portera sur l'étude des algorithmes de routage multi-chemins dans les RCSFs.

3.1 Introduction

Le routage multi-chemin comprend un grand axe de recherche, et cela pour les performances remarquable qu'il peut fournir à un RCSF, Dépendamment du protocole de routage utilisé, Ce dernier peut atteindre des objectifs que le routage simple ne pourrait pas réaliser.

Dans ce chapitre, Nous allons tout d'abord définir ce qui est le routage multi-chemins, ensuite nous allons nous intéresser à ses objectifs, aux principes de base de conception, sa relation avec la qualité de service. Enfin nous allons nous intéresser à une classification des différents protocoles de routage multi-chemins et puis terminé avec une conclusion.

3.2 Définition du routage multi-chemins

A l'opposé au routage traditionnel qui consiste à sélectionner un seul chemin en partant d'un nœud source vers un nœud destination, le routage multi-chemins, comme son nom l'indique permet de sélectionner un ensemble de chemins entre le nœud source et le nœud destination.

L'objectif de ces chemins est d'améliorer la qualité de transmission, à savoir l'équilibrage de charge, une meilleure fiabilité, un délai de bout en bout réduit, etc [53].

La figure 3.1 montre un exemple du routage multi-chemins.

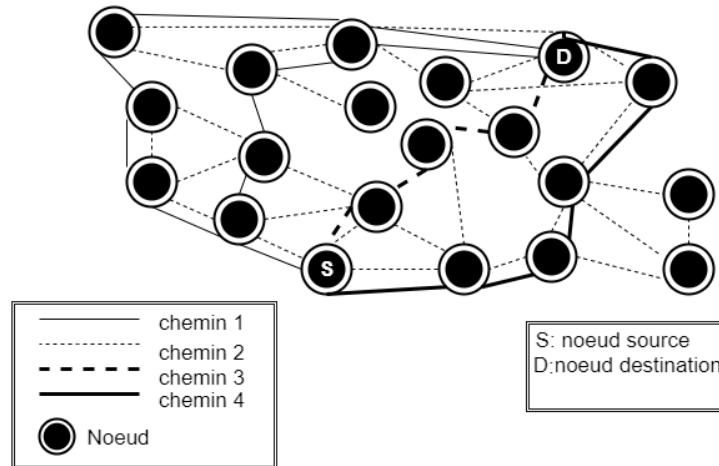


FIGURE 3.1 – Exemple de routage multi-chemins [55].

3.3 Objectifs du routage multi-chemins

Les objectifs sur lesquels reposer le routage multi-chemins sont les suivants [56] :

3.3.1 Tolérance aux pannes

La tolérance aux pannes est l'objectif qui pourrait être classé en premier, car si on n'a pas de tolérance aux pannes, on ne pourra pas assurer la disponibilité du réseau.

Elle est réalisé via deux approches qui sont les suivantes :

La première approche consiste à envoyer de paquets redondants sur des chemins multiples, tandis que la deuxième approche établie à l'avance un ou plusieurs chemins de secours en cas de panne.

3.3.2 Partage de charge

C'est l'utilisation optimale des ressources disponibles dans le réseau. Plusieurs travaux ont montré que la répartition des données d'un flux sur des chemins multiples, au lieu d'acheminer le flux sur un seul chemin, pourrait réduire la congestion du réseau de capteurs.

3.3.3 Augmentation de la bande passante offerte à un flux

Un routage basé sur une stratégie multi-chemins peut offrir une forte bande passante, via les différents chemins utilisés en parallèle et qui est plus importante que celle offerte par un chemin unique. Ceci peut permettre de satisfaire les besoins en bande passante d'une application nécessitant une importante bande passante.

3.3.4 Amélioration de la QoS

Les algorithmes de routage multi-chemins dans les RCSFs permettent d'améliorer la QoS du réseau et cela dépendamment de l'algorithme de routage utilisé. Chaque algorithme essaie d'apporter une amélioration sur une ou plusieurs QoS, tel que :

Le délai bout en bout, la durée de vie du réseau, l'énergie moyenne consommé, etc.

3.4 Principes de base de la conception des protocoles de routage Multi-chemins

Afin de concevoir un protocole de routage multi-chemins, il y'a plusieurs composantes à prendre en considération, parmi lesquels nous citons [53] :

3.4.1 Découverte de routes

Le principe de ce processus est de déterminer un ensemble de nœuds intermédiaires qui devraient être choisis pour déterminer plusieurs chemins à partir des nœuds source vers le nœud destination [53], [54]. Différents paramètres sont utilisés dans les protocoles de routage multi-chemins pour désigner les nœuds intermédiaires.

Parmi ces paramètres, on trouve le taux de disjonction des chemins, qui est le principal critère utilisé par les protocoles de routage multi-chemins existants pour découvrir les différents chemins disponible entre les nœuds sources et le nœud destinataire [53]. Comme le montre la figure 3.2, les chemins découverts peuvent être généralement classés comme des chemins à nœuds-disjoints, à liens-disjoints ou partiellement disjoints.

Dans ce qui suit, nous définissons les trois notions :

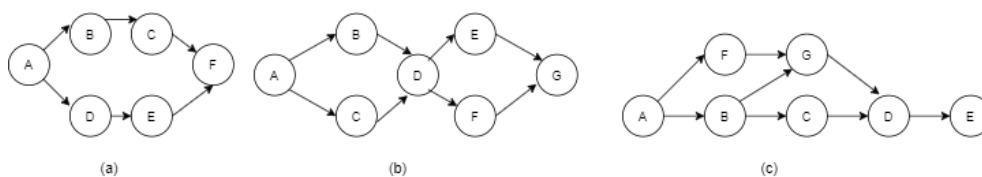


FIGURE 3.2 – Types de disjonction de chemins [53].

A. Les chemins à nœud disjoints

Dans ce type de chemin, il n'y a pas de nœud ou de lien en commun entre les chemins découverts à part le nœud source et le nœud destination. Chaque échec de nœud ou de lien dans un ensemble de chemins à nœuds-disjoints affecte uniquement le chemin qui contient le nœud ou le lien échoué.

C'est pour cela que ce type de chemins est préférable aux autres types de chemins [56].

B. Les chemins à liens-disjoints

Ce type de chemin peut avoir des nœuds en communs, Mais qui ne partagent pas les mêmes liens, Il est considéré plus facile de trouver des chemins à liens disjoints que des chemins à nœuds disjoints et cela à cause du déploiement aléatoire des nœuds.

L'avantage de ce type de chemin est de permettre une meilleure répartition des charges sur les capteurs, mais son principal inconvénient est que toute défaillance d'un nœud dans un ensemble de chemins à liens disjoints peut entraîner à l'échec de plusieurs chemins qui partagent le nœud défaillant [56].

C. Les chemins partiellement disjoints

Ils peuvent inclure plusieurs chemins, qui partagent plusieurs liens ou nœuds. En comparaison avec les types de disjonction de chemins ci-dessus, toute défaillance d'un lien ou d'un nœud dans un ensemble de chemins partiellement disjoints peut affecter plusieurs chemins. Cependant, la construction des chemins partiellement disjoints peut être réalisée facilement [56].

3.4.2 Fonction coût

Une fonction coût est utilisée par les protocoles de routage pour prendre la meilleure décision de routage basée sur la demande liée aux exigences de performances des applications. L'objectif principal d'une fonction coût est d'atteindre un objectif de la QoS. Dans ce cas, plusieurs fonctions sont utilisées dans le routage multi-chemins pour mesurer la capacité des différents nœuds ou des liens pour garantir les exigences des différentes applications et parmi ces exigences on notera :

- Maximisation du débit.
- Minimisation du délai de bout-en-bout.
- Amélioration de la durée de vie du réseau.
- Distribution du trafic, etc...

Il est important à savoir que, la longueur du chemin, le taux de perte de paquets, le délai et le niveau résiduel de la batterie des nœuds capteurs sont parmi les composants de base des fonctions coût de routage utilisées par les protocoles de routage multi-chemins existants [56]. C'est ce qui sera détaillé dans ce qui suit.

3.4.3 Sélection de routes

Après avoir découvert les chemins du réseau, une sélection d'un nombre suffisant de routes devrait être abordée et ceci afin de répondre à certaines exigences.

Cette étape est la plus importante lors la conception d'un protocole de routage multi-chemins

de haute performance. Un protocole multi-chemins peut décider d'utiliser seulement le meilleur chemin pour la transmission de données et de garder les chemins supplémentaires comme des chemins alternatifs pour faire face à la tolérance aux pannes.

Le nombre de chemins sélectionnés joue un rôle important pour améliorer les différents paramètres de performance. Mais utiliser un grand nombre de chemins ne veut pas dire obligatoirement augmenter les performances du réseau et le fait d'utiliser un petit nombre de chemins pourrait ne pas exploiter les capacités des RCSFs [53].

3.4.4 Distribution de trafic

L'idée clé d'un algorithme de routage est d'améliorer les performances, telles que le débit, le taux de livraison de données, le délai et la durée de vie. Un mécanisme efficace d'équilibrage de charge peut être utilisé pour distribuer l'ensemble du trafic réseau sur les chemins construits. En d'autres termes, pour améliorer l'utilisation des ressources sur des chemins individuels, le taux du trafic distribué sur chaque chemin doit être calculé selon sa capacité [53].

3.4.5 Maintenance de routes

La limitation des ressources des capteurs peut entraîner à une panne d'un ou plusieurs chemins, donc la redécouverte du chemin devrait être réalisée afin de réduire la dégradation des performances du réseau [53, 54].

Le processus de redécouverte du chemin peut être lancé dans trois situations différentes et qui sont :

- 1- Lorsque le chemin actif a échoué.
- 2 -Lorsque tous les chemins actifs ont échoué.
- 3 -Lorsqu'un certain nombre de chemins actifs a échoué.

3.5 Routage multi-chemins et la QoS

De nos jours, nous constatons une augmentation considérable du trafic réseau et un accroissement semblable pour le trafic sensible à différents paramètres de qualité de service tel que le trafic généré par les applications interactives temps réel et les applications de streaming. Ainsi, la garantie d'un niveau satisfaisant de QoS pour ces différentes applications est actuellement considérée comme un challenge très important dans les réseaux de télécommunication. Dans ce cadre, le routage multi-chemins basé sur la QoS est l'une des solutions adoptées pour les réseaux RCSFs afin de satisfaire les besoins des différentes applications.

La majorité de ces protocoles se basent sur une amélioration des protocoles de routage utilisés pour ce type de réseaux tout en intégrant des métriques de routage considérant la qualité des liens dans le réseau. Certains de ces protocoles s'appuient sur des métriques permettant d'estimer le taux des ressources disponibles en termes de bande passante tout en tenant compte des interférences. De plus, nous retrouvons des protocoles de routage qui se basent sur des métriques multi critères en prenant en considération entre autres la bande passante ainsi que le délai de bout en bout.

Toutefois, ces métriques ne permettent pas d'assurer une qualité satisfaisante pour des applications ayant des contraintes différentes en termes de QoS telles que les applications de Streaming qui sont fortement sensibles à la variation des paramètres de la gigue.

Enfin, ces applications peuvent utiliser une métrique multi-critères basée sur trois métriques basiques, à savoir la bande passante, le délai et la gigue, pour la sélection de la meilleure route [57].

3.6 Classification des protocoles de routage multi-chemins

Les protocoles de routages multi-chemins peuvent être classifiés en quatre classes à savoir : routage basé sur une métrique simple, routage multi-métriques, routage basé sur les informations du positionnement global et routage basé sur une communication gérée par la station de base[53].

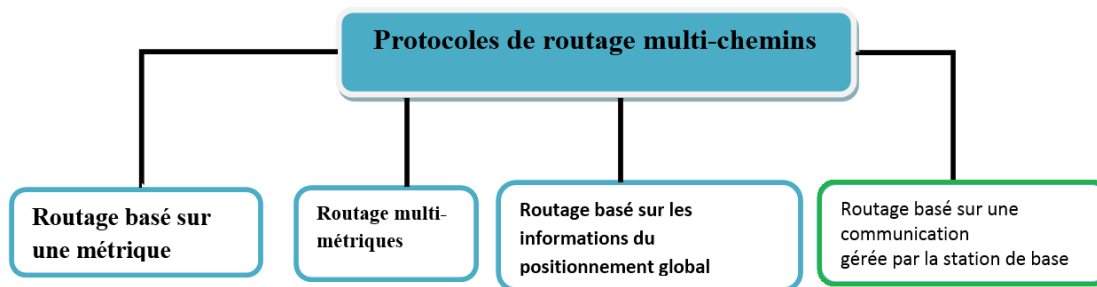


FIGURE 3.3 – Classification des protocoles de routage multi-chemins[53].

3.6.1 Routage basé sur une métrique simple

Cette classe se base sur un seul critère (par exemple le délai) pour sélectionner les multiples chemins.

Dans cette classe, nous allons présenter deux protocoles multi-chemins, qui utilisent un seul critère pour sélectionner leurs chemins et qui sont :

1. Flooding Path Probability metric and Unicast Retransmission Flow (FPP and URF)

Flooding Path Probability metric (FPP) : la métrique de probabilité d'inondation d'un chemin

mesure la probabilité de livraison de paquets de bout-en-bout lorsque chaque nœud diffuse un paquet après l'écoute de tous ses voisins.

Unicast Retransmission Flow (URF) : la métrique de flux de retransmission unicast mesure la probabilité de livraison de paquets de bout-en-bout quand un nœud intermédiaire retransmet un paquet en unicast sur ses liens sortants jusqu'à ce qu'il reçoive un accusé de réception ou essaie tous les liens.

Les deux métriques reposent sur des modèles spécifiques de transmission de paquets, plutôt que des heuristiques, pour dériver des expressions explicites de la probabilité de livraison de paquets de bout-en-bout à partir des probabilités des liens individuels et du graphe de connectivité sous-jacent. Un algorithme qui suit le principe de faire, étape par étape, un choix optimum local distribué qui utilise la métrique URF pour construire une topologie de routage fiable est également proposé. Cet algorithme construit un graphe qui ne possède pas de circuit non orienté, où chaque lien est un graphe auquel on adjoint une fonction de valuation par la probabilité de réussite. L'algorithme utilise un vecteur de diminution des seuils de fiabilité pour coordonner lorsque les nœuds peuvent se joindre à la topologie de routage. Toutefois, ce travail se concentre uniquement sur la mesure de la fiabilité et ignore les autres paramètres importants comme le délai et ne considère pas les limitations de l'énergie et de la taille mémoire des nœuds capteurs [58].

2. Ad-hoc On-demand Multi-path Routing with Lifetime Maximization(AOMR-LM)

Ce protocole de routage multi-chemins à liens-disjoints a été proposé par O. Smail et al. dans [61]. Il est nommé Ad-hoc On-demand Multi-path Routing with Lifetime Maximization (AOMR-LM), ayant comme objectif principal le prolongement de la durée de vie du réseau.

Les niveaux d'énergie des nœuds sont utilisés pour classer les chemins entre une source et une destination. Le niveau d'énergie d'un nœud est calculé en fonction de son énergie résiduelle. A la fin de l'opération de découverte on aura un ensemble de chemins homogènes en terme d'énergie.

3.6.2 Routage multi-métriques

Cette classe se base sur la sélection des chemins répondants à plusieurs critères (par exemple délai, la durée de vie, le nombre de sauts etc.).

Dans ce qui suit, nous allons présenter des protocoles de cette classe et qui sont :

1. Low Interference Energy Efficient Multi-path Routing Protocol(LIEMRO)

M. Radi et al. ont proposé LIEMRO [57], un protocole de routage multi-chemins qui améliore les performances des RCSFs événementiels grâce à la construction d'un nombre suffisant de chemins avec une interférence minimisée. LIEMRO utilise une approche itérative adaptative pour construire un nombre suffisant de chemins à nœuds disjoints avec moins d'interférences à partir de chaque zone d'événements vers le nœud destination. 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 des chemins selon la qualité perçue des derniers

chemins. Cependant, comme la plupart des protocoles décrits précédemment, LIEMRO ne prend pas en considération les effets de la capacité limitée des mémoires et le taux de service des nœuds actifs pour estimer et ajuster le taux de trafic des chemins actifs.

2. Sequential Assignment Routing(SAR)

K. Sohrabi et al. ont proposé Sequential Assignment Routing (SAR) [62], un protocole conçu pour les RCSFs et qui prend en considération les exigences de délai et l'équilibrage de charge dans ses décisions de routage. Le protocole SAR crée des arbres à partir des voisins à un saut du noeud sink, en prenant en considération le délai, l'énergie et le niveau de priorité pour chaque paquet. En utilisant ces arbres créés, plusieurs chemins sont formés à partir du sink vers les noeuds capteurs. Néanmoins, le protocole SAR souffre de la charge de maintenance des états des noeuds lorsque le nombre de noeuds est grand.

3.6.3 Routage basé sur la position globale

Cette classe exige les informations de positionnement global précises pour sélectionner les différents chemins, permettant la transmission des données depuis une source vers une destination. Dans le reste de cette sous-section, nous présenterons deux protocoles utilisant les informations de positionnement globale pour acheminer leurs données.

1. QoS NETwork for routing protocols in large scale wireless sensor networks(QoSNET) T. H. Badji et al. ont proposé QoS NETwork for routing protocols in large scale wireless sensor networks (QoSNET) [59], un protocole de routage multi-chemins avec QoS dans les RCSFs à grande échelle. Pour faire face au facteur d'échelle, la méthode proposée divise le réseau de capteurs en deux sous réseaux. Le premier comprend des contrôleurs de cellules et éventuellement d'autres nœuds puissants tels que les actionneurs, tandis que le second se compose de nœuds capteurs restants. Un mécanisme de commutation basé sur un phénomène de seuil associé à la transmission d'une information permet au nœud qui a un paquet à transmettre de sélectionner des nœuds entre ses voisins dans les deux sous réseaux. Ce protocole nécessite des informations de positionnement global et ainsi, des systèmes additionnels de localisation coûteux sont nécessaires. En outre, il ne considère pas la limitation de la taille mémoire des nœuds capteurs.

2. Real Time Routing Protocol with Load Distribution in wireless sensor networks (RTL D).

A. A. Ahmed et al. ont proposé Real Time Routing Protocol with Load Distribution in wireless sensor networks (RTL D) [63], un nouveau type de communication dans les RCSFs appelé transmission geo-direction-cast. La transmission geo-direction-cast combine le geo-cast d'une transmission directionnelle avec un protocole de routage temps réel. Ceci pour transmettre les paquets de données à travers les multiples chemins vers la destination. En effet, le protocole de routage temps réel calcule un noeud de transmission optimal basé sur le taux de réception de paquets, l'énergie résiduelle des noeuds capteurs et la vitesse des paquets sur un saut. Toutefois, ce protocole utilise un positionnement global pour la sélection des routes et a besoin d'informations de positionnement

exact, d'ailleurs il ne tient pas compte de la limitation de la taille mémoire des nœuds capteurs.

3.6.4 Routage basé sur la communication gérée par la station de base

Dans cette classe, la station de base est chargée de déterminer toutes les routes existantes dans le réseau, ainsi que de choisir la route optimale qui sera utilisée pour transmettre les données depuis une source vers une destination.

parmi les protocoles les plus récents et qui font partie de cette classe, nous citons :

1. Energy Aware Sink Initiated Multi-path Routing Protocol (EASIMP)

Le protocole EASIMP[64] est un protocole multi-chemins, dédié aux applications orientées requêtes. Dans ce protocole, la station de base initie la communication par la diffusion d'une requête aux nœuds cibles (elle diffuse la requête à tous les nœuds dans les réseaux, la station de base est une station avec capacité illimitée', mais sauf les nœuds concernés par cette requête qui vont la traiter). Dans cette requête, la station de base va mettre le chemin à suivre pour retourner la donnée, ainsi que la période nécessaire pour effectuer cette communication (en se basant sur les informations collectées dans la période de découverte).

Le choix des nœuds participants à la communication sera effectué suivant une stratégie minimisant la consommation d'énergie, et assurant l'équilibrage de charge (plusieurs stratégies existants dans la littérature). A chaque communication, on choisit la stratégie appropriée à la situation actuelle (c'est-à-dire la stratégie adéquate pour maximiser les énergies résiduelles des nœuds et minimiser la différence en énergie résiduelle entre les différents nœuds), donc, ce n'est pas forcément de choisir la même stratégie à chaque fois.

Quand la station de base diffuse la requête avec les informations (les identificateurs des nœuds, la période de communication), les nœuds qui ne vont pas participer à cette communication peuvent passer au mode sommeil. Ils ne vont pas se réveiller jusqu'à ce que la communication se termine.

Après que la station de base reçoive les données, elle mettra à jour l'énergie résiduelle de tous les nœuds (car tous les nœuds, dans le réseau, ont reçu la requête), ainsi que celles des nœuds participant à la communication.

2. Optimized QoS-based Multipath Routing Protocol (OQoS-MRP)

Le protocole OQoS-MRP [65] est un protocole multi-chemins qui est formulé suivant un ensemble des métriques. Ces dernières sont basées sur les performances des liens entre chaque nœud et son voisin aussi que les performances des différents chemins dans le réseau, tel que chaque capteur est capable d'enregistrer les performances des liens entre lui et ses voisins en termes de fiabilité, d'énergie, de délai, de distance jusqu'à la station de base.

OQoS-MRP est divisé en trois phases. La première phase établit la découverte du voisin et la construction de la topologie, la deuxième phase trouve le chemin optimal le plus court et la dernière phase fournit la procédure de routage des données réelles .

3.7 Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins étudiés .

Dans cette section, nous allons comparer les différents protocoles étudiés précédemment.

Protocole	Classe	Paramètres de la QoS	Energie	Métriques de décision de routage	Application	Type de capteurs
FPP&URF	Métrique simple	fiabilité	oui	taux de livraison de paquet	périodique	simple
AOMR-LM	Métrique simple	durée de vie	oui	énergie résiduelle	événementiel	simple
SAR	Multi-métriques	délai	oui	délai , énergie	périodique	simple
LIEMRO	Multi-métriques	délai et fiabilité	oui	débit	événementiel	simple
RTLD	Positionnement globale	délai et fiabilité	oui	taux de livraison de paquet , énergie réiduelle	périodique	capteur avec gps
QoS-NET	Positionnement globale	délai et fiabilité	oui	positionnement globale	événementiel	capteur avec gps
EASIMP	Communication initier par la station de base	délai et durée de vie	oui	énergie	orienté requête	simple
OQoS-MRP	Communication initier par la station de base	délai et durée de vie	oui	fiabilité, énergie, délai ,distance	événementiel	simple

TABLE 3.1 – Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins étudiés .

A partir du tableau 3.1, nous remarquons que chacun des protocoles de routage multi-chemins présentés dans ce chapitre inclut plusieurs composants pour construire des chemins multiples et répartir le trafic réseau sur les chemins découverts. Cependant, comme le montre le tableau 3.1, nous remarquons aussi qu'il y a des protocoles qui ne garantissent pas les exigences de la QoS suffisantes pour les RCSFs , car ils utilisent une seule métrique pour la sélection des routes, comme l'énergie ou le nombre de sauts et ne tiennent pas compte des exigences de fiabilité.

D'autres protocoles peuvent exiger des informations de positionnement global précises. En outre, la plupart de ces protocoles ne considèrent pas les limitations des noeuds capteurs, notamment l'énergie.

Par contre les protocoles de la dernière classe sont meilleurs car ils augmentent la durée de vie de leurs réseaux en assurant un bon équilibre de charge.

3.8 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons vu de manière détaillée les protocoles de routage multi-chemins dans les RCSFs et leur contribution à l'amélioration des qualités de services, ainsi que la prolongation de la durée de vie.

Ces protocoles ont été classifiés en quatre classes dont la dernière, qui est la classe de communication géré par la station de base, présente des performances meilleures par rapport aux autres classes.Ce qui nous motive d'étudier cette classe davantage dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 4

NOTRE PROPOSITION : PROTOCOLE I-EASIMP

4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons étudier de manière détaillée les protocoles de routage, OQoS-MRP, EASIMP et I-EASIMP, qui sont de la classe des protocoles de routage multi-chemins, qui se basent sur la communication initiée par la station de base, tout en exploitant les caractéristiques de chaque protocole, grâce à cela nous allons présenter une amélioration du protocole EASIMP et que nous allons nommer I-EASIMP.

Les résultats de notre travail seront illustrés à travers ce chapitre, et cela en faisant une étude comparative des protocoles OQoS-MRP, EASIMP et I-EASIMP.

4.2 Fonctionnement détaillé des protocoles OQoS-MRP, EASIMP et I-EASIMP.

Dans cette section, on va expliquer le fonctionnement détaillé des deux protocoles étudiés OQoS-MRP, EASIMP et notre protocole amélioré I-EASIMP.

4.2.1 Protocole OQoS-MRP

Le protocole de routage OQoS-MRP[65] est un protocole dédié aux réseaux de capteurs sans fil, qui a la particularité que chaque capteur est capable d'enregistrer les performances de la liaison entre lui et son voisin en termes de fiabilité, d'énergie, de délai et de distance vers la station de base. Dans le routage multi-chemins, pour trouver la garantie totale de bout en bout sur tous les chemins utilisés, on divise la fiabilité de bout en bout, la consommation d'énergie de bout en bout et le délai de bout en bout.

Ce protocole est divisé en trois phases. La première phase concerne la découverte des voisins et la construction de la topologie. La deuxième phase trouve le chemin optimal le plus court à l'aide de

l'algorithme SingleSink-AllDestination. La dernière phase détermine la procédure de transmission des données.

A. Phase de découverte des voisins et la construction de la topologie

Après le déploiement des capteurs, la station de base initialise la phase de découverte des voisins. Dans cette phase, chaque capteur diffuse un message à tous les voisins de la zone de couverture, puis met à jour périodiquement l'état local de ses voisins actifs.

La phase de construction de la topologie démarre, après la phase de découverte des voisins. Au lieu de l'inondation, chaque capteur utilise une technique de multidiffusion pour transmettre ses informations de voisinage. Le capteur (v) sélectionne le nœud à partir de $Nbr(v)$, qui est un ensemble de nœuds voisins de v et envoyer le paquet Nbr-Info une seule fois. Ce qui évite de faire une boucle dans le réseau. Ce processus réduit le trafic sur le réseau et économise l'énergie. Chaque capteur conserve une liste d'informations sur les voisins reçus. La station de base crée la matrice d'adjacence des voisins lorsqu'il reçoit le Nbr-Info des capteurs .

Cette matrice est un $(n + 1) \times (n + 1)$, où n est le nombre de capteurs dans le réseau et une station de base. La matrice d'adjacence montre la topologie du réseau et la connectivité entre ces nœuds. En fonction de la matrice d'adjacence, le récepteur choisit les chemins de routage de la source au récepteur.

B. Phase Découverte du chemin optimale

Dans cette phase, chaque capteur diffuse des valeurs de seuil (R_{req} , E_{min} , D_{req}) spécifiques à l'application à tous ses capteurs voisins actifs via un message de demande d'itinéraire où :

R_{req} : représente la fiabilité de bout en bout.

E_{min} : représente l'énergie minimum consommée de bout en bout.

D_{req} : représente le délai de bout en bout .

Les capteurs voisins vérifient s'il satisfait aux valeurs de seuil spécifiques à l'application, puis il envoie un message de réponse de route. Le message de réponse d'itinéraire est unicast tandis que le message de demande d'itinéraire est en broadcast (diffusion) .

Chaque capteur stocke les contraintes de la QoS dans une table des voisins, les valeurs de liens associées à chaque voisin afin de sélectionner le nœud suivant avec un coût minimum, ensuite il met à jour la table des voisins.

La station de base trouve un ensemble de chemins disponibles, $P = Path1, Path2, .. Pathnp$ de la station de base vers tous les capteurs en prenant le minimum du $cost_{vw}$: tel que :

$$cost_{vw} = \frac{R_{req}}{R_{vw}} + \frac{E_{vw}}{E_{min}} + \frac{D_{vw}}{D_{req}}$$

C. Phase de transmission de données

Un capteur peut jouer le rôle d'une source ou d'un capteur de relais. Si le récepteur et la source ou les capteurs de relais se trouvent dans la même zone de couverture, les paquets peuvent être envoyés directement au récepteur. Sinon, le capteur transmet le paquet au récepteur via des communications à sauts multiples. L'algorithme proposé utilise à la fois un chemin unique et un routage à chemins multiples afin de sélectionner l'itinéraire quasi optimal avec un coût minimum. Lorsqu'un événement se produit, le capteur source envoie des données vers l'un des capteurs voisins en tant que saut suivant dans sa zone de couverture en recherchant sa table de routage qui remplit les critères suivants :

- Le nœud voisin est le voisin le plus proche de la station de base avec un nombre de sauts minimum par rapport aux autres nœuds voisins.
- L'énergie résiduelle du nœud voisin est supérieure ou égale à la valeur seuil.
- Pour sélectionner le chemin du coût minimum dans le cadre de la stratégie de transmission.

-Discussion

Ce protocole de routage souffre d'un problème qui est le gaspillage d'énergie lors de la phase de construction de topologie et découverte des routes, car tous les nœuds y participent, mais il permet d'assurer une fiabilité de façon optimale, il minimise la consommation d'énergie tout en respectant le plus court délai de transmission possible.

4.2.2 Protocole EASIMP

Ce protocole EASIMP[64] agit en trois phases pour établir des routes entre une station source (un capteur) et la station destination (la station de base) qui procédera éventuellement aux traitements des données reçues.

Les étapes sont décrites comme suit :

A. Phase de découverte :

la station de base envoie un message NEIDET-PK pour que chaque nœud puisse déterminer ses voisins directs, en se basant sur les équations Eq.1 et Eq.2 :

Ci après des illustrations qui expliquent comment déterminer les voisins de chaque nœud dans le réseau.

$$d(i,j) < R_i \dots\dots\dots (Eq.1)$$

$$d(i,BS) < \sqrt{d(j,i)^2 + d(i,BS)^2} \dots\dots\dots (Eq.2)$$

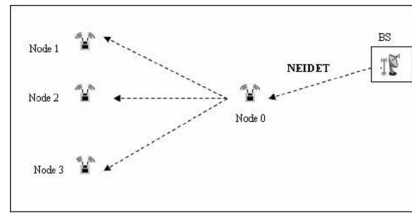


FIGURE 4.1 – Diffusion du NEIDET PK.

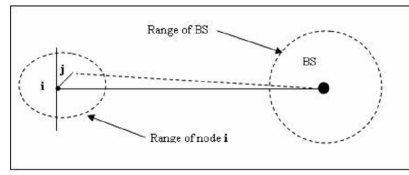


FIGURE 4.2 – Découverte de voisins

Après avoir déterminé les voisins directs ainsi que les coûts (en termes d'énergie et de temps de transmission : à partir de la distance, les nœuds vont informer la station de base par les informations collectées durant la phase de découverte en envoyant le paquet TOPDIS (Topology Discover packet) suivant.

nœud i	energie i	ses voisins j	Distance ij
--------	-----------	---------------	-------------

A chaque fois qu'un nœud reçoit un paquet TOPDIS, celui-ci, avant de le rediffuser (la diffusion doit être d'une manière sélective, c'est-à-dire pour éviter que la station de base reçoive la même information plusieurs fois 'sur des chemins différents', le nœud émetteur sélectionne l'un de ses voisins pour s'occuper de cette tâche), met au niveau de l'entête de ce paquet sa propre adresse, la liste de ses voisins, les coûts énergétiques et temporels. De cette manière, la station de base aura une idée sur tous les nœuds dans le réseau (leurs positions, le coût énergétique de chaque lien entre chaque deux nœud, ainsi que le temps nécessaire pour traverser ce lien).

Une nouvelle table contenant des informations sur chaque nœud et ses voisins dans sa zone de couverture, cette dernière contient des informations qui seront utilisées par la station de base pour permettre de sélectionner le chemin à travers lequel sera routé l'information.

-NEIDET PK(neighbor discovery packet) Le paquet qui permet la découverte des voisins.

nœud i	énergie i	voisins j	Distance (i,j)
.	.	.	.
		.	.
		.	.
		.	.
.	.	.	.
		.	.
		.	.

TABLE 4.1 – Table de voisins

B. Etape de transmission de donnée

C'est l'étape fondamentale du protocole qui agit en deux sous étapes, qui sont décrites comme suit :

1. Phase de la découverte du chemin optimal

Après avoir découvert la topologie du réseau, on utilise la table de voisins pour calculer toutes les routes du nœud source vers le nœud destination et cela en utilisant le chemin optimal en termes d'énergie, délai de transmission. En suite détermine le meilleur chemin et on envoie le paquet PASTEL.

2. Phase de transmission de données

Étant la dernière étape, celle-ci commence là où le paquet PASTEL est envoyé. Grâce au paquet PASTEL qui sera envoyé à partir de la station de base vers le nœud source, ce dernier va utiliser le chemin inverse à travers lequel le paquet PASTEL est envoyé pour permettre à la station de base de recevoir les données envoyées par le nœud source.

-PASTEL(path selection) Ensemble de nœuds qui appartient au chemin

-Discussion

Ce protocole a comme avantage l'augmentation de la durée de vie du réseau, car, il prend toujours les chemins qui consomment le minimum d'énergie néanmoins, il néglige d'autres métriques de la QoS, d'où est venue l'idée de proposer le protocole I-EASIMP qui permet un meilleur équilibre des charges et d'autres métriques de la QoS, c'est ce que nous allons voir dans ces sections à venir.

4.3 Protocole I-EASIMP

I-EASIMP est un protocole multi-chemins dont la communication est initiée par la station de base. En d'autres termes, c'est une version améliorée du protocole EASIMP qui adopte presque les mêmes étapes que lui, mais avec une stratégie différente du choix du meilleur chemin.

L'idée de base derrière l'amélioration du protocole EASIMP s'incruste dans l'étape du choix du meilleur chemin. On a introduit un changement lors du choix de la route qui est décrit comme suit :



Le choix du prochain nœud sera en fonction de deux critères :

-L'énergie résiduelle maximale.

-L'énergie consommée.

c'est à dire, quand un nœud sélectionne son prochain voisin qui recevra ses données, il sélectionnera son voisin qui possédera l'énergie résiduelle maximale et qui consomme moins d'énergie pour assurer la transmission de ses données. On peut résumer ce qu'on a expliqué par l'équation suivante :

$$f = MAX\left(\frac{EnergieResiduelle}{Cout}\right)$$

Sachant que le coût du lien représente l'énergie consommée pour assurer la transmission des données sur un lien. L'amélioration apportée, avec l'introduction de ce changement dans le protocole pourrait améliorer les différents paramètres de la QoS, qui seront démontrés dans la section résultats et discussion. Ces paramètres sont les suivant :

-Durée de vie du réseau,

-Taux de livraison de paquets,

-Délai moyen de bout en bout.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du protocole, nous avons mis l'illustration suivante :

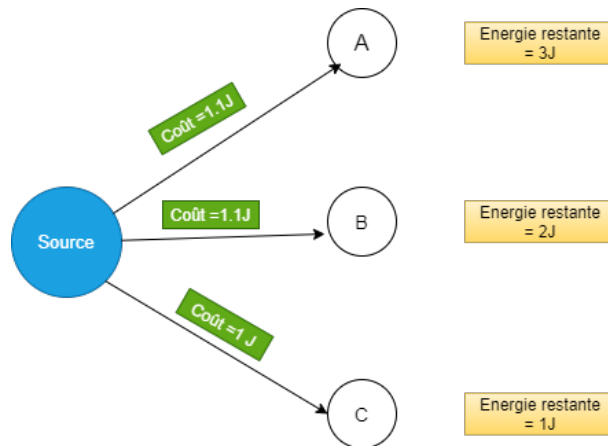


FIGURE 4.3 – Exemple de fonctionnement du protocole EASIMP amélioré

Sur la figure 4.3, on a un nœud source qui a 3 voisins A,B et C .

Le coût énergétique de chaque lien qui sépare la source de ses voisins sont 1.1 j, 1.1 j et 1 j respectivement .

-Les énergies résiduelles de ces nœuds sont 3 joules, 2 joules et 1 joule.

-Supposons que le nœud source veuille transmettre ses données en se basant sur I-EASIMP, le nœud à chemin sera le nœud A.Car, il offre le meilleure rapport *énergie résiduelle /coût de lien*. Par contre, si on applique le protocole EASIMP, on aura comme prochain noeud : le nœud C.

Dans ce cas là, après la transmission de la donnée, le nœud C épuise la totalité de son énergie et il sera inutile pour une prochaine communication.

4.4 Evaluation de performances des protocoles OQoS-MRP, EASIMP,I-EASIMP

Cette section est consacrée à l'évaluation de performances des protocoles OQoS-MRP, EASIMP et I-EASIMP ,leur simulation et enfin les résultat de la simulation

4.4.1 Etapes de réalisation du simulateur

4.4.1.1 Choix de l'environnement de simulation

Nous avons choisi comme langage de programmation, pour implémenter notre protocole,le langage MATLAB (MATrixLABoratory), qui est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement des applications, la visualisation et l'analyse de données, ou encore le calcul numérique.

Le langage MATLAB met à la disposition du développeur les opérations vectorielles et matricielles, fondamentales pour résoudre les problèmes d'ingénierie et scientifiques. Il permet un développement

et une exécution rapide à l'égard du langage MATLAB, nous pouvons programmer et tester des algorithmes plus rapidement qu'avec les langages traditionnels. Car, il n'est pas nécessaire d'effectuer les tâches de programmation de bas niveau, comme la déclaration des variables, la spécification des types de données et l'allocation de la mémoire. Ce qui nous motive d'utiliser ce langage pour évaluer les performances des trois protocoles : OQoS-MRP, EASIMP et I-EASIMP

Les IHM (Interface Homme Machine), sont appelées GUI (Graphic User Interfaces) dans MATLAB. Elles permettent à des objets graphique (boutons, menus, cases à cocher, ...) d'interagir avec un programme informatique.

4.4.1.2 Étapes de simulation des trois protocoles de routage

Pour mieux comprendre le fonctionnement des protocoles OQoS-MRP, EASIMP et I-EASIMP, nous utiliserons les organigrammes suivants, qui nous donnent une idée générale sur les principales étapes de l'implémentation de ces protocoles.

— Organigramme du protocole OQoS-MRP

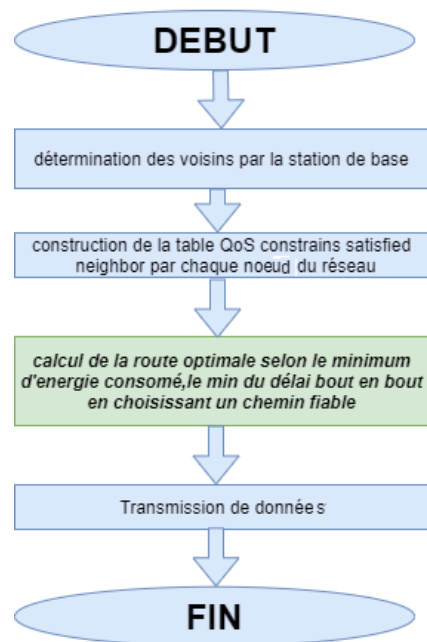


FIGURE 4.4 – Organigramme du protocole OQoS-MRP

— Organigramme du protocole EASIMP

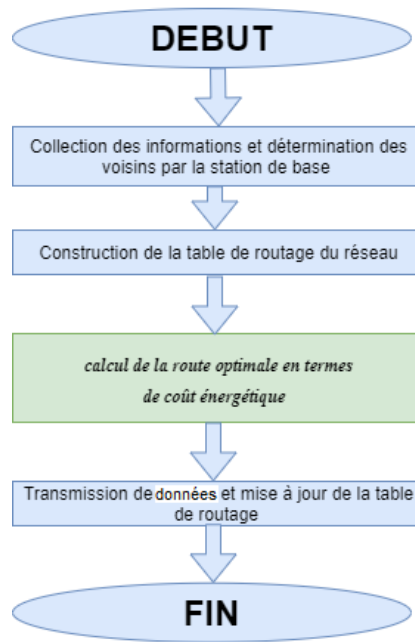


FIGURE 4.5 – Organigramme du protocole EASIMP

— Organigramme du protocole I-EASIMP

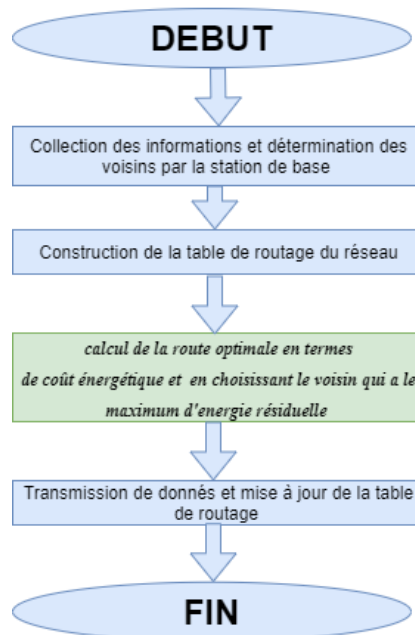


FIGURE 4.6 – Organigramme du protocole I-EASIMP

4.4.2 Métriques d'évaluation de performances utilisées

- **Taux de Livraison de Paquets de données (TLP)**

Le TLP est défini comme le rapport entre le nombre de paquets de données reçus avec succès par la station de base et le nombre de paquets de données générés par la source. Cette métrique de performance permet de nous indiquer le niveau de données livré avec succès. Une grande valeur de TLP signifie une meilleure performance du protocole [67]. La formule mathématique est donnée comme suit :

$$TLP = \frac{PRD}{PGS}$$

PRD : Représente le nombre de paquets reçus par la destination.

PGS : Représente le nombre de paquets générés par la source.

- **Délai moyen de Bout en Bout (DMBB)**

Une autre métrique importante dans l'évaluation des performances des protocoles de routage est le DMBB. Elle représente le temps nécessaire aux paquets de données pour atteindre la destination divisé par le nombre de paquets reçus. Plus la valeur de DMBB est petite, meilleure sera la performance du protocole [66]. Sa formule est donnée comme suit :

$$DMBB = \frac{\sum_{i=1}^{NPR} TL}{NPR}$$

TL : Représente le temps écoulé pour livrer un paquet à la destination.

NPR : Représente le nombre de paquets reçus par la destination.

- **Durée de Vie du Réseau (DVR)**

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où le premier nœud épuise toute son énergie source ou si un nœud ne parvient pas à atteindre un de ses voisins dans sa zone de couverture car tous ses voisins ont une énergie qui ne permet pas la réception ou l'envoi du paquet qui est sensé être reçu[68].

- **Modèle énergétique**

Le modèle radio proposé par Heinzelman [31] a été utilisé pour calculer l'énergie par un nœud lors de l'émission et la réception d'un message . Selon ce modèle, l'énergie consommée pendant la transmission est calculée à l'aide de la formule suivante :

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

Par contre l'énergie consommée pendant la réception est donnée par :

$$E_r = E_{elec} * pk$$

Où :

- E_{elec} : est l'énergie consommée par le transceiver électronique.
- pk : est la taille d'un message.
- E_{amp} : est l'énergie consommée par l'amplificateur d'émetteur.
- d : est la distance en mètre entre l'émetteur et le récepteur.
- Les sources d'énergies des nœuds ont été initialisées à 3 joules.
- L'exécution de la simulation a été effectuée pendant une période de 300 secondes.
- Les valeurs de E_{elec} et E_{amp} sont respectivement $0.002*d$ Joule, 0.02 Joule.

4.4.3 Paramètres de simulation

Les algorithmes simulés sont comparés grâce à des paramètres de simulation qui sont les suivants :

Paramètre	Valeur
Dimension de la zone de déploiement	20x20 m
Coordonnées de la station de base	(0, 0)
Energie de la station de base	Illimité
Taille d'un paquet	256 Bits
Énergie d'amplification des multi-chemins E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
Énergie électronique E_{elec}	$0.002*d$ J
Énergie initiale	5J
Nombre de nœuds statiques	50 à 100
Type d'antenne	unidirectionnel
Portée des capteurs	5 M
Nombre de paquets envoyés	300

TABLE 4.2 – Paramètres de simulations

4.4.4 Résultats et discussions

Dans cette partie, nous discutons les résultats de simulation obtenus suivant les métriques de performances citées précédemment.

4.4.4.1 Taux de livraison de paquet

Le taux de livraison de paquet par rapport aux 300 paquets envoyés est exprimé dans la figure 4.7

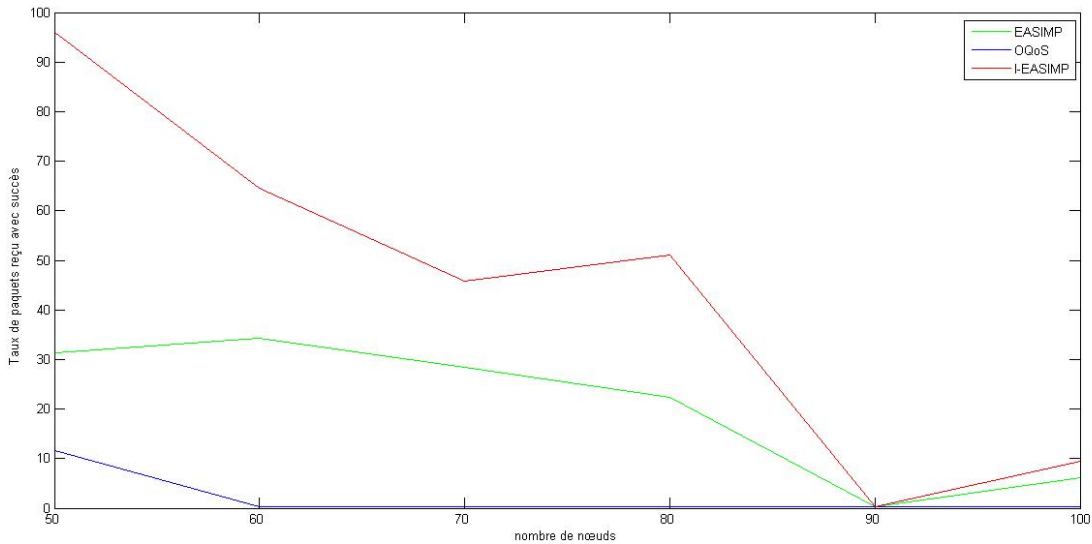


FIGURE 4.7 – Taux de livraison de paquet vs nombre de nœuds.

Le protocole proposé I-EASIMP amélioré à 50 nœuds offre un taux de livraison de paquet qui est de presque 96 %, ce qui est supérieur aux taux de OQoS-MRP et EASIMP. On remarque aussi que plus le nombre de capteurs augmente plus le taux de livraison diminue et cela est dû à l'étape de construction de la topologie dans les 3 protocoles. On remarque que le protocole OQoS-MRP est inadapté pour offrir un bon taux de livraison de paquets.

4.4.4.2 Délai moyen de bout en bout

Concernant le délai moyen de bout en bout, le graphe ci-dessous exprime cette métrique en fonction du nombre de nœud en seconde.

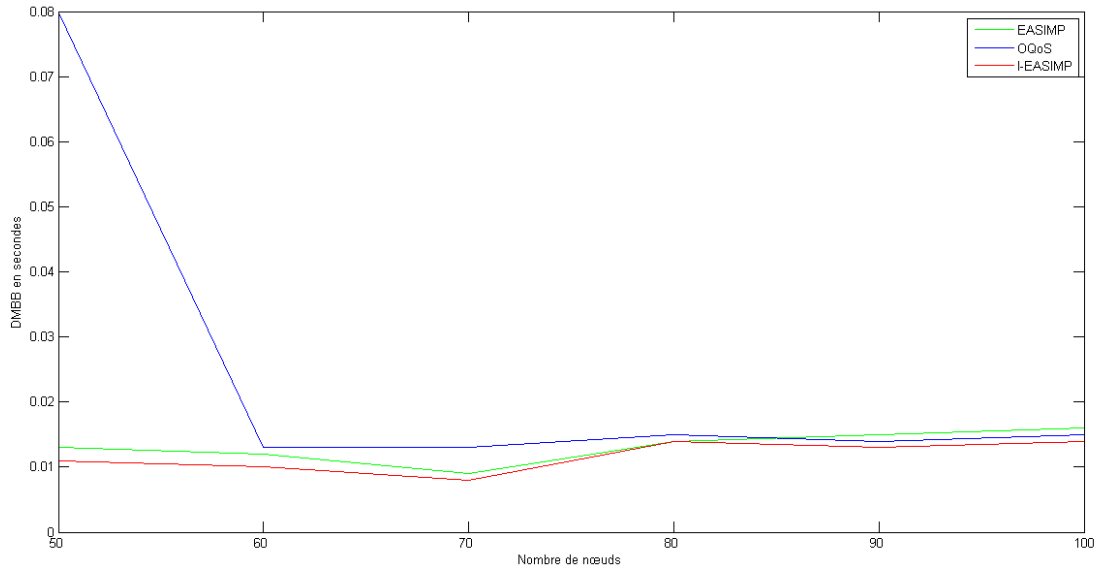


FIGURE 4.8 – Délai de bout en bout vs nombre de nœuds.

Les résultats qu’offrent les trois protocoles de routage par rapport au délai moyen de bout en bout se concordent parfaitement avec les résultats acquis par rapport à la Durée de vie du réseau, Taux de livraison de paquet .

On notera aussi que plus le nombre de nœud du réseau augmente plus le délai diminue et cela est dû au rapport nombre de paquet reçu avec succès par la station de base, sur la durée de vie.

4.4.4.3 Durée de vie du réau

La figure 4.9 nous montre la durée de vie du réseau exprimé en seconde en fonction du nombre de nœuds.

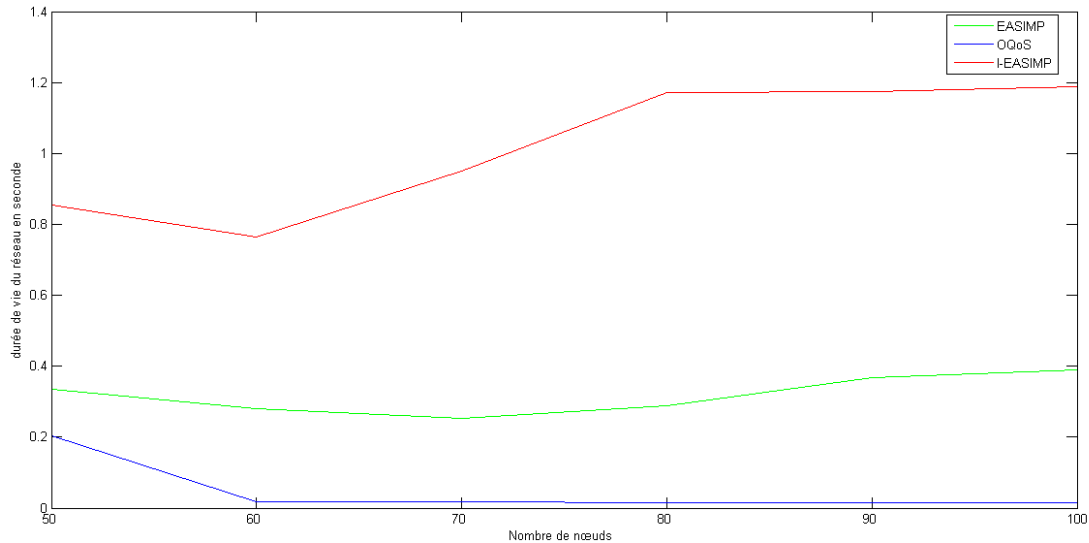


FIGURE 4.9 – Durée de vie du réseau vs nombre de nœuds.

On remarque nettement que par rapport aux deux algorithmes, I-EASIMP offre une meilleure durée de vie et cela est dû au choix du prochain nœud car il prend en compte le fait qu'un nœud puisse tomber en panne (énergie épuisé) lors de la transmission de données, on notera aussi que le protocole OQoS-MRP consomme beaucoup d'énergie et cela est dû à la phase de construction de la topologie, donc, plus le nombre de nœud augmente plus la durée de vie du réseau diminue. Par rapport aux 60 nœuds, on remarque que pour les trois protocoles, leur durée de vie a nettement baissé et cela est dû à certains nœuds isolés qui ont de l'énergie mais qui n'ont pas de voisins dans leurs champs de couverture.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a proposé le protocole I-EASIMP qui améliore les performances du réseau en termes de : taux de livraison de paquets, délai moyen de bout en bout, durée de vie du réseau. Ce protocole exploite parfaitement les avantages de EASIMP et ajoute un détail qui le rend meilleur que OQoS-MRP et EASIMP.

Nous avons fait une analyse comparative des performances de ces trois protocoles afin de savoir quel algorithme de routage choisir en cas d'une future implémentation dans une application qui vise un objectif précis de la QoS.

A travers les différents résultats, nous avons pu déduire que le protocole I-EASIMP fournit une meilleure durée de vie avec un équilibrage de la charge sur tous les nœuds du réseau par rapport aux protocoles OQoS-MRP et EASIMP. De plus, il permet d'augmenter le débit et d'offrir un meilleur taux de livraison de paquets.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les RCSFs ont connu une grande évolution au fil des années, notamment sur les fonctionnalités qu'ils offrent aux différentes applications (militaire, santé, agriculture, etc ;). Malgré ça, les RCSFs doivent faire face aux défis et obstacles rencontrés au cours de leur fonctionnement, à savoir la contrainte d'énergie et les différents paramètres de la QoS.

En effet, ce travail nous a permis de cerner un certain nombre de protocoles de routage multi-chemins, classés selon quatre classes principales conformément à leurs stratégies de routage et leurs modes de fonctionnement à savoir :

Routage basé sur une métrique simple, routage multi-métriques, routage basé sur les informations du positionnement global et routage basé sur une communication gérée par la station de base .

Par la suite, nous avons étudié les différentes métriques de la QoS dans les RCSFs.

Ainsi, nous nous sommes inspirés de l'architecture de routage avec QoS pour définir les objectifs qui vont nous permettre d'améliorer la qualité de service dans un RCSF.

Dans notre travail, nous avons proposé une version améliorée du protocole multi-chemins EASIMP, qu'on a nommée I-EASIMP. Cette variante s'appuie presque sur les mêmes étapes du protocole EASIMP mais avec une stratégie différentes du choix de meilleure chemin. On a introduit un changement lors du choix de la route qui est décrit comme suit :

Le choix du prochain nœud sera en fonction de deux critères :

-L'énergie résiduelle maximale.

-L'énergie consommée.

C'est à dire, quand un nœud sélectionne son prochain voisin qui recevra ses données, il sélectionnera son voisin qui possédera l'énergie résiduelle maximale et qui consomme moins d'énergie pour assurer la transmission de ses données, leur tâche est d'assurer une longue durée de vie du réseau, minimum délai moyen de bout en bout et un taux de livraison de paquets de données maximum.

Notre protocole I-EASIMP se déroule en quatre étapes :

-Collection des informations et détermination des voisins par la station de base.

-Construction de la table de routage du réseau.

- Calcul de la route optimale en termes de coût énergétique en choisissons le voisin qui a le maximum d'énergie résiduelle .
- Transmission de données et mise a jour de la table de routage.

L'évaluation de notre proposition a été faite sous MATLAB. Les résultats de simulation obtenus ont montré que notre algorithme offre de meilleures performances en termes de la durée de vie du réseau,délai moyen de bout en bout et le taux de livraison de paquets de données, en comparant avec les protocoles EASIMP,OQoS-MRP.

En guise de perspectives, il est judicieux :

- De comparer notre algorithme avec d'autres protocoles qui appartiennent à la même classe.
- De simuler notre algorithme sur d'autres simulateurs tels que OMNET, OPNET, NS3,etc.
- D'expérimenter notre algorithme sur une plate-forme réelle de capteurs.
- Essayer d'améliorer le protocole OQoS-MRP en utilisant la même fonction objective de I-EASIMP.

- [1] Khelladi L and Baadache N. Les réseaux de capteurs : état de l'Art. Rapport de Recherche, Université Bab Ezzouar-Alger, 2004.
- [2] Beydoun K. Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2009.
- [3] Bouabdellah K, Problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, thèse de doctorat, Université d'Oran Ahmed Ben Bela, 2007.
- [4] Yaser Y. Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 2011.
- [5] Sankarasubramaniam Y. Akyildiz I.F., Su W and Cayirci E, A survey on sensornetworks, IEEE Communications Magazine, pp. 102-114, 2002.
- [6] Diery N, Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité, Thèse de doctorat , université de Haute Alsace (France) et université Cheikh Anta Diop(Sénégal), 2016.
- [7] Bouchakour KH. Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil : Protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy), Thèse de Magister, ESI, 2007.
- [8] Derdour Y, Conception et Développement d'un système d'Exploration bas sur les Réseaux de Capteurs sans Fil avec Sink Mobile,Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2015.
- [9] Baumgartner K, Réseaux de capteurs sans fil, International Bachelor Communication and Media, Décembre 2005.
- [10] Hill J, Szewczyk R, Woo A, Hollar S, David C, Kristofer P ,System Architecture Directions for Networked , Article, 2000.
- [11] Levis PH, Gay D, and Culler D, Bridging the Gap, Programming Sensor Networks with Application Specific Virtual Machines , Article, 2004.
- [12] Kone CH. T, Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, 2011.

-
- [13] Tilak S, Abu-Ghazaleh N, Heinzelman W, A taxonomy of wireless micro-sensor network models, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review archive, volume 6, pp.28-36.
- [14] Akyildiz I.K, Su W, Sankarasubramaniam Y, and Cayirci E. l. Wireless sensor networks : A survey. IEEE Computer Networks, Vol.38, No.4, pp.393-422, 2002.
- [16] Réseaux Radioélectriques, Croissance des services radioélectriques , Magasine, Stratégies Télécom Multimedia, 2008.
- [18] Hu F, Sharma N, Security consideration in ad hoc sensor networks, Article, 2003.
- [19] Raileanu L et Nastaran F, Les Réseaux de Senseurs , 2006.
- [20] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi K, Ganesan D, Broad A, Govindan R, and Estrin D. A wireless sensor network for structural monitoring. In Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked Sensor Systems , pages 13-24, 2004.
- [21] Petriu E , Georganas N.D, Petriu D.C, Makrakis D., and Groza V.Z. Sensor-based information appliances. IEEE Instrumentation Measurement Magazine, vol.3, no.4, pp.31-35,2000.
- [23] Khelifi M, Optimisation de la consommation de l'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil, mémoire de magister, 2008.
- [25] Akyildiz I.F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E, Energy Efficiency based Packet Size Optimization in Wireless Sensor Networks, Article , 2002.
- [26] Akkaya K, Younis M, A survey on routing protocols for wireless sensor network", AdHoc Networks, Vol. 3, pp. 325-349, 2005.
- [27] Diery N , Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité, Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace (France), 2016.
- [28] Ramassamy C. Analyse des protocoles des Réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat, 2012.
- [29] Meraihi R. Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc. Thèse de doctorat, 2005
- [30] Yang K, A study on power-friendly routing protocols for sensor networks, Technical Report, University of Essex Department of Electronic Systems Engineering, 2005.
- [31] Heinzelman W, Chandrakasan A, and Balakrishnan H, Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks, Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, 2000.
- [32] Akkaya K , Younis M, A survey on routing protocols for wireless sensor networks, Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, 2005.
- [33] Yao Y , Gehrke J, The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, ACM SIGMOD Record, Vol. 31, No. 3, pp. 9-18, 2002.
- [34] Hac A, Wireless sensor network designs, John wiley and sons ltd edition, 2003.

-
- [35] Tilak S, Abu-Ghazaleh N.B , and Heinzelman W, A taxonomy of wireless micro-sensor network models, *ACM Mobile Computing and Communication Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 28-36, 2002.
- [36] El-Hoidy A, Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power adhoc wireless sensor networks, *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*,2002.
- [37] Dwevdi A.K, Vyas O.P,Network Layer Protocols for Wireless Sensor Networks : Existing Classifications and Design Challenges, *International Journal of Computer Applications*, 2010.
- [38] Al-Karaki N ,Kamal A.E, Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : a Survey, *IEEE Wireless Communications*, 2004.
- [39] Sohraby K, Minoli D, et Znati T, *Wireless Sensor Networks : Technology, Protocols, and Applications*, 2007 .
- [40] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Directed Diffusion : a Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks, *ACM MobiCom 2000*, 2000.
- [41] Chandrakasan A, Balakrishnan H , Heinzelman Z, Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *33rd Hawaii Intl. Conf. Sys. Sci.*,2000.
- [42] Ehsan S ,Hamdaoui B, A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks, *IEEE Communications* 2012.
- [43] Yu Y, Govindan R, Estrin D, Geographical and energy-aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks, *Technical Report, UCLA-CSDTR-01-0023*,2001.
- [44] Leuschner C.J , The design of a simple energy efficient routing protocol to improve wireless sensor network lifetime, 2005.
- [45] Alatrasta H, Aliaga S , Gouaïch K, Mathieu J, Implémentation de protocole sur une plateforme de réseaux de capteurs sans-fils, *Université de Montpellier*, 2008.
- [46] Al-Karaki J.N, Ahmed E.K, Routing techniques in wireless sensor networks : a survey , dept. of electrical and computer engineering, *Iowa State University*, 2004.
- [47] Braginsky C.D, Estrin D, Rumor routing algorithm for sensor networks, *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks Applications (WSNA)*, pp. 22-31, 2002.
- [48] Heinzelman W, Kulik J, Balakrishnan H, Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks, *5th ACM/IEEE Mobicom*, 1999.
- [49] Sohrabi K, Pottie J, Protocols for self-organization of a wireless sensor network ,*IEEE Personal Commun*, 2000.
- [50] Ehsan S ,Hamdaoui B, A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks, *IEEE COMMUNICATIONS* ,2012
- [51] Bhuyan B,Kumar H, Sarma D, Sarma N, Kar A, Quality of Service (QoS) Provisions in Wireless Sensor Networks and Related Challenges ,2010.

-
- [52] Hamzi A, Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de magister, 2007.
- [53] Tiab A, Routage dans les réseaux capteurs sans fils en environnement industriel : économie d'énergie et qualité de service, 2017.
- [54] Sha K, Gehlot J and Greve R, Multipath Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey, *Wireless Personal Communications*, pp 807–829, 2013.
- [56] Doghri I, Stratégies de routage multi-chemin dans les réseaux sans fil multi-sauts, Thèse de doctorat, 2013.
- [57] Radi M , Dezfouli B ,Bakar K , Abdrazak S, Nematbakhsh M A ,Interference-Aware Multipath Routing Protocol for QoS Improvement in Event-Driven Wireless Sensor Networks. *Tsinghua Sci. Tech.* 2011.
- [58] Chen P, Johansson H K ,Paul B ,Bollobas and Sastry S, Multi-path Routing Metrics for Reliable Wireless Mesh Routing Topologies, *Networking and Internet Architecture*, 2011.
- [59] Hounghbadji T and Pierre S, QoSNET : An integrated QoS network for routing protocol in large scale wireless sensor networks, *Computer Communications*, Vol. 33, No.11, 2010.
- [60] Guan K and L-M.He, A novel energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks, *IEEE International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC)*, 2010.
- [61] Smail O, Cousin B, Mekki R and Mekkakia Z, A Multipath Energy-Conserving Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks Lifetime Improvement, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014.
- [62] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V and Potie G J, Protocols for self-organization of a wireless sensor network, *IEEE Personal Communications*, 2000.
- [63] Ahmed A and Faisal N, A real-time routing protocol with load distribution in wireless sensor networks, *Computer Communications*, 2008.
- [64] Boulfekhar S, Tiab A, Bouallouche L. Sink-Initiated Multipath Routing Protocol with Energy Conservation for Wireless Sensor Networks. *The 6th International Conference on Information Systems and Technologies*, Espagne, 2016.
- [65] Onthachi D and Jayabal S, An Optimized QoS-based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks *Information Digest on Energy and Environment*, 2017.
- [66] Nazir B and Hasbullah H, Energy efficient and QoS aware routing protocol for Clustered Wireless Sensor Network, *Computers and Electrical Engineering*, 2013.
- [67] Lee C-Y, Shiu L-C, Lin F-T and Yang C-S, Distributed topology control algorithm on broadcasting in wireless sensor network, *Journal of Network and Computer Applications*, 2013.
- [68] Yessad S, Bouallouche-Medjkoune L and Aïssani D , A Cross-Layer Routing Protocol for Balancing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks, *Wireless Personal Communications*, 2015.

- [15] www.researchgate.net/figure/La-vision-dun-capteur-depend-du-rayon-de-reception-de-son-module-de-communication-fig1-229021928
- [17] www.Kelkoo.fr , « Cle USB Bluetooth pc », 2008.
- [22] www.tutomotique.fr/la-domotique-pour-quoi-faire/2-2/
- [24] www.researchgate.net/figure/Pile-protocolaire-des-RCSFs-Suivant-la-fonctionnalite-des-capteurs-differentes-fig2-298762567
- [55] www.researchgate.net/figure/Network-architecture-Algorithm-Multipath-routing-algorithm-followed-by-detailed-functions-fig5-271304423

RESUME

Le routage de données avec Qualité de Service (QoS) dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) est l'une des plus importantes problématiques rencontrées dans ce type de réseaux. Dans ce contexte, nous avons étudié et amélioré le protocole de routage multi-chemins EASIMP (pour Energy Aware Sink Initiated Multi-path Routing Protocol), en proposant la variante I-EASMP (pour Improved- EASMP).

L'objectif principal du protocole I-EASMP est de minimiser l'énergie consommée dans le réseau ainsi que de garantir un certains critères de QoS, comme réduire le taux de perte des paquets et diminuer le délai de transmission de données. Pour atteindre ses objectifs, I-EASIMP utilise un ensemble des chemins entre la station de base et les nœuds sources et sélectionne le chemin le plus performant en termes d'énergie/ délai.

L'étude comparative menée par simulation entre les performances des protocoles EASIMP, OQoS-MRP (pour Optimized QoS-based Multipath Routing Protocol), qui est un protocole de routage multi-chemins avec QoS pour les RCSF, et notre protocole amélioré I-EASIMP a été réalisée avec le langage MATLEB. Les résultats obtenus montrent que notre protocole I-EASIMP améliore les performances du réseau en améliorant les différents paramètres de QoS, à savoir : la durée de vie du réseau, le taux de paquets perdus ainsi que le délai de transmission de données.

Mots clés : RCSF, Routage, Routage multi-chemins, QoS, EASMP, Evaluation de performances.

ABSTRACT

Data routing with Quality of Service (QoS) in Wireless Sensor Networks (WSNs) is one of the most important issues encountered in this type of network. In this context, we have studied and improved the EASIMP (for Energy Aware Sink Initiated Multi-path Routing Protocol) multi-path routing protocol, by proposing the I-EASMP variant (for Improved - EASMP).

The main objective of the I-EASMP protocol is to minimize the energy consumed by the network as well as to guarantee certain QoS criteria, such as reducing the packet loss rate and reducing the data transmission delay. To achieve its objectives, I-EASIMP uses a set of paths between the base station and the source nodes and selects the most efficient path in terms of energy / delay.

The comparative study carried out by simulation between the performances of the EASIMP, OQoS-MRP (for Optimized QoS-based Multipath Routing Protocol) protocols, which is a multi-path routing protocol with QoS for WSNs, and our improved I-EASIMP protocol was performed using the MATLEB language. The results obtained show that our I-EASMP protocol improves network performance by improving the various QoS parameters, namely : network lifetime, packet loss rate and data transmission delay.

Key words : WSN, Routing, Multipath routing, QoS, EASMP, Performance evaluation.