

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



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

*Mémoire de fin de cycle
en vue d'obtention du diplôme de master professionnelle en informatique
spécialité : Administration et sécurité réseau*

Thème

Evaluation des performances d'un protocole de routage multi-chemins dans les RCSFs.

Présenté par

M^{elle} **BENTARA** Nassima

M^{elle} **AIT ALIOUA** Malika

Jury :

Présidente M^{lle} **RABOUHE** Nadjette, MAA, Université de Béjaïa.

Promoteur M^{lle} **BOULFEKHAR** Samra, MCA, Université de Béjaïa.

Examinatrice M^{me} **MAMMERI** Karima, MAA, Université de Béjaïa.

Promotion 2016/2017

Remerciement

Notre premier remerciement va à Allah qui nous a donné le courage, la volonté et la patience de mener ce travail à terme.

Nous tenons à remercier M^{lle} BOULFEKHAR Samra, notre promotrice, pour son aide, ses conseils ses encouragements et ses orientation nous ont guidés jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions aussi les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail et de nous faire part de leurs remarques pertinentes.

Nous exprimons notre plus grande gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicas

À vant 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 notre mémoire à :

À mes très chers parents qui sont la bougie qui illumine ma vie

À mon futur mari ZIANE Amine pour son soutien, sa compréhension et ces encouragements

À mes frères Badis et Yacine

À ma sœur Kahina

À mes chères copines Maïssa et Kamilia

À toute ma grande famille, à tous mes amis et à tous mes enseignants.

Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Nassima

Dicaces

Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage pour accomplir
ce modeste travail que je dédie :

À mon très cher Papa

À ma très adorable Maman

À mon cher frère Abdou

À mes sœurs, Daouia, Rahma et Hanane

À mon meilleur ami SAADI Houssame pour son soutien et ses
encouragements

À mes oncle BEN ZAOUCH Mohand et ma tante BEN
ZAOUCH Houriya

À mon très cher grand père

À ma très chère grande mère

À toute ma famille, mes cousins et mes cousines

Et à tous ceux qui m'aiment

Malika

Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude de routage multi-chemins dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs), où nous avons proposé une nouvelle classe de routage multi-chemins basée sur une communication gérée par la station de bas. Son principe c'est que la station de base chargée de déterminer et de trouver toutes les routes existantes dans le réseau ainsi choisir la route optimale en termes de coût énergétique.

Dans notre travail nous avons étudié un ensemble des protocoles multi-chemins et nous avons implémenté trois protocoles choisis de cette classe. Ces protocoles sont : EASIMP (Energy-Aware Sink-Initiated Multi-path Routing protocol), EBMR (Energy-Balancing Multi-path Routing protocol) et EPSR (Efficient Path Setup and Recovery protocol). L'étude comparative menée par la simulation entre les performances de ces trois protocoles a été réalisée avec le langage Java. Les résultats de simulation ont montrés que le protocole EASIMP est le meilleur, car il permet d'équilibrer la consommation d'énergie de tous les nœuds, par conséquent, augmente la durée de vie du réseau.

Mots clé : RCSF, Routage Multi-chemins, Java, Simulation.

Abstract

In this paper, we are interested in the study of multi-path routing in the Wireless Sensor Networks (WSN), where we proposed a new multi-path routing class based on a communication managed by the base station. Its principle is that the base station responsible for determining and finding all existing routes in the network thus choose the optimum route in terms of energy cost.

In our work we studied a set of multi-path protocols and we implemented three chosen protocols of this class. These protocols are : EASIMP (Energy-Aware Sink-Initiated Multi-path Routing protocol), EBMR (Energy-Balancing Multi-path Routing protocol) et EPSR (Efficient Path Setup and Recovery protocol). The comparative study carried out by the simulation between the performances of these three protocols was carried out with the Java language. The simulation results showed that the EASIMP protocol is the best, because it balances the energy consumption of all nodes, therefore, increases the lifetime of the network.

Key words : WSN, Multi-path routing, Java, Simulation.

Table des matières

Table des Matières	i
Liste des tableaux	iii
Table des figures	iv
Introduction générale	1
1 Généralités sur les RCSFs	3
1.1 Introduction	3
1.2 Réseaux Ad hoc	3
1.3 Les réseaux de capteur sans fil	4
1.3.1 Définitions	4
1.3.2 Architecture d'un RCSF	4
1.3.3 Architecture d'un nœud capteur	5
1.3.4 Caractéristiques d'un RCSFs	6
1.3.5 Applications des RCSFs	7
1.3.6 Communication dans les RCSFs	9
1.3.7 Facteurs de conception d'un réseau de capteurs sans fil	13
1.4 Conclusion	15
2 Routage dans les RCSFs	16
2.1 Introduction	16
2.2 Routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs	16
2.2.1 Route à énergie disponible maximum.	18
2.2.2 Route à énergie de transmission minimum	18

2.2.3	Route à nombre de sauts minimum	18
2.2.4	Route à nœud ayant le maximum des minimums des énergies disponibles	19
2.3	Protocoles de routage dans les RCSFs	19
2.3.1	Protocoles basé sur la structure du réseau	19
2.3.2	Protocoles basés sur l’initiateur de la communication .	24
2.3.3	Protocoles basés sur le fonctionnement des protocoles .	26
2.4	Conclusion	31
3	Routage multi-chemins dans les RCSFs	33
3.1	Introduction	33
3.2	Routage multi-chemins	33
3.2.1	Définition	33
3.2.2	Objectifs du routage multi-chemins	35
3.3	Classification des protocoles de routage multi-chemins	36
3.3.1	Routage basé sur une métrique simple	36
3.3.2	Routage multi-métrique	37
3.3.3	Routage basé sur la position globale	38
3.3.4	Routage basé sur la communication gérée par la station de base	39
3.4	Tableau comparatif et discussion	43
3.5	Conclusion	45
4	Evaluation des performances des protocoles EASIMP, EBMR et EPSR	46
4.1	Introduction	46
4.2	Implémentation	47
4.3	Environnements de simulation	48
4.3.1	Choix de l’environnement de simulation	49
4.4	Métriques de performances	50
4.5	Le modél énergétique	51
4.6	Paramètres de simulation	52
4.7	Discusion des resultats	53
4.8	Conclusion	56
	Conclusion générale et perspectives	57

Liste des tableaux

3.1	Tableau comparatif des protocoles de routage multi-chemins. .	44
4.1	Paramètres de simulation.	52

Table des figures

1.1	L'architecture d'un RCSF [6].	5
1.2	L'architecture physique d'un capteur [6].	6
1.3	Réseau de capteur militaire [6].	8
1.4	Ensemble de capteurs dans un corp humain [6].	8
1.5	Application agricole [6].	9
1.6	La pile protocolaire dans les RCSFs [8].	10
2.1	Routes efficaces en consommation d'énergie [1].	17
2.2	Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau [18].	20
2.3	Phases de communication du protocole Directed Diffusion [15].	22
2.4	le protocole SPIN.	29
3.1	Types de chemins dans le routage multi-chemins [3].	34
3.2	Classification des protocoles de routage multi-chemins [5]. . .	36
4.1	Organigramme utilisé pour implémenter EASIMP.	47
4.2	Organigramme utilisé pour implémenter EPSR.	47
4.3	Organigramme utilisé pour implémenter EBMR.	48
4.4	Délai moyen de bout en bout vs nombre de nœud.	53
4.5	Energie moyenne consommée vs nombre de nœud (Joules). . .	54
4.6	Durée de vie de réseau vs nombre de nœud (seconds).	55
4.7	Taux de livraison vs nombre de nœud.	56

Liste des abréviations

BNTR	B uild N etwork T opology R equest
DD	D irected D iffusion
DBBM	D élai M oyen de B out en B out
DVR	D urée de V ie du R éseau
EANDMRP	E nergy A ware N ode D isjoint M ultipath R outing proto- col
EASIMP	E nergy- A ware S ink- I nitiated M ultipath R outing proto- col
EBMR	E nergy- B alancing M ultipath R outing protocol
EMC	E nergie M oyenne C onsommée
EPSR	E fficient P ath S etup and R ecovery protocol
GEAR	G eographique and E nergy A ware R outing
GPS	G lobal P ositioning S ystem
ILR	I mproving L ifetime and R eliability in R outing R eal- Time
J-SIM	J ava- S imulator
LBNL	L awrence B erkeley N ational L aboratory
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy
LLC	L ogiciel L ink C ontrol

MAC	M edium A ccess C ontrol
MANET	M obile A d hoc N etwork
MMRE-AOMDV	M aximal M inimal R esidual E nergy A d hoc O n-demand M ultipath D istance V ector
MMSPEED	M ultiPath M ulti S PEED
MPSR	M ultiPath S ource R outing P rotocol
NAM	N etwork A nimator
NC	N eighbors C ollection
NCR	N eighbors C ollection R épondre
ND	N eighbors D iscovery
NS-2	N etwork S imulator- 2
OMNET++	O bjective M odular N ETwork T est-bet in C++
OS	O perating S ystem
OSI	O pen S ystems I nterconnection
QoS	Q uality of S ervice
RR	R umor R outing
RREP	R oute R EPlY
RREQ	R oute R EQuest
SAR	S equential A ssignment R outing
SPIN	S ensor P rotocol for I nformation N egotiation
TLP	T aux de L ivraison de P aquets
WSN	W ireless S ensor N etwork

Introduction générale

Depuis leurs créations, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. De ce constat une nouvelle architecture a vu le jour : les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs).

Un RCSF est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs qui sont limités en ce qui concerne l’approvisionnement en énergie, la capacité de calcul restreinte et la consommation de bande passante.

Plusieurs études antérieures dans le domaine des RCSFs ont mis l’accent sur des mécanismes traditionnels de routage, les protocoles dont ils disposent sont généralement caractérisés par un faible débit de données, un faible coût et une faible consommation énergétique pour transmettre ces données d’une source vers une destination. Afin de remédier à tous ces problèmes, un nouveau concept de routage appelé le routage multi-chemins est apparu pour bénéficier de tous les avantages offerts.

Le concept de routage multi-chemins consiste à trouver pour chaque nœud source un multiple choix de chemins lui permettant d’atteindre une destination particulière, ce qui donne naissance à plusieurs avantages à savoir l’augmentation de délai et de la durée de vie ainsi qu’une bonne optimisation d’énergie qui est le résultat de détermination efficace des nœuds relais. En se basant sur le principe de sélection du plus court chemin, nous allons classer les protocoles de routage multi-chemins selon quatre classes : routage basé sur une seule métrique, routage multi-métriques, routage basé sur le positionnement global et routage basé sur la communication initiée par la station de base. Cette dernière classe sera le cœur de notre travail. Pour

cela, nous allons implémenter et évaluer les performances de trois protocoles de cette classe appelés : EASIMP (Energy-Aware Sink-Initiated Multi-path Routing protocol), EBMR (Energy-Balancing Multi-path Routing protocol) et EPSR (Efficient Path Setup and Recovery protocol) pour remédier aux problèmes cités auparavant.

Pour relater 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, leurs caractéristiques et leurs facteurs de conception.
- Le deuxième chapitre traite le routage dans les réseaux de capteurs sans fil.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons notre thème d'étude avec plus de détails à savoir le routage multi-chemins dans les RCSFs, où nous étudierons les différentes classifications des protocoles de routage multi-chemins. En se concentrant sur la classe qui se base sur la communication gérée par la station de base.
- Dans le quatrième chapitre, nous illustrerons les différents résultats de simulation obtenus avec une comparaison des performances des trois protocoles de routage multi-chemins suivants : EBMR, EASIMP et EPSR.

Enfin, notre mémoire se termine avec une conclusion générale et des perspectives que nous voulons réaliser prochainement.

Généralités sur les RCSFs

1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont parmi les technologies les plus importantes de nos jours. Ces réseaux sont constitués d'un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capable de récolter et de transmettre des données de manière autonome. Les nœuds capteurs composants le réseau possèdent généralement de faibles capacités de calcul, de mémoire et d'énergie. Ces contraintes matérielles ont influencé une grande partie des problématiques de recherche du domaine tel que le routage.

Le but de ce chapitre est de présenter cette nouvelle technologie qui est susceptible d'être déployer dans de divers domaines applicatifs. Pour mieux cerner les enjeux du sujet, nous présenterons dans ce qui suit, ce que sont les réseaux Ad hoc, les réseaux de capteurs, les capteurs, ainsi qu'un aperçu sur l'ensemble de notions nécessaires à la compréhension de la suite du mémoire.

1.2 Réseaux Ad hoc

Un réseau ad hoc, appelé généralement MANET (*Mobile Ad hoc Network*), est une collection d'unités mobiles munies d'interfaces de communication sans fil, formant un réseau temporaire sans recourir à aucune infrastructure fixe ou administration centralisée .Dans de tels environnements, les unités se comportent comme des hôtes et/ou des routeurs.

Les nœuds des MANETs sont équipés d'émetteurs et de récepteurs sans fil utilisant des antennes qui peuvent être omnidirectionnelles (*broadcast*) ,

fortement directionnelles (*point à point*), ou une combinaison de ces deux types. Ils maintiennent d'une manière coopérative la connectivité du réseau, en fonction de leurs positions, la configuration de leurs émetteurs/récepteurs, la puissance de transmission et les interférences entre les canaux de communication [2].

1.3 Les réseaux de capteur sans fil

Un réseau de capteur sans fil est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux (*ordinateur portable, capteur, etc.*) peuvent communiquer sans liaison filaire. Les réseaux sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques au lieu de placés des câbles. Il existe plusieurs technologies se distinguant d'un part la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et d'autre part la portée de transmission.

1.3.1 Définitions

a) Un capteur

Un capteur est mini-composant, qui permet d'acquérir des données sur son environnement, les traiter et les communiquer. Son intégration est une tâche difficile à réaliser en tenant compte de certaines contraintes : l'espace mémoire, la consommation énergétique, etc [4].

b) Un réseau de capteur

Un RCSF (*réseau de capteurs sans fil*) est un type particulier des réseaux mobiles ad hoc. Il est composé d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil [6].

1.3.2 Architecture d'un RCSF

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds capteurs. Ces nœuds capteurs sont organisés en champs "*Sensor Fields*" (*voir figure suivante*). Chacun de ces nœuds a la capacité de collecter des données et de les transférer au nœud passerelle (*dit "sink" en anglais ou puits*) par l'intermédiaire d'une

architecture multi-sauts. Le puits transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central "*Gestionnaire de tâches*" pour analyser ces données et prendre des décisions [6].

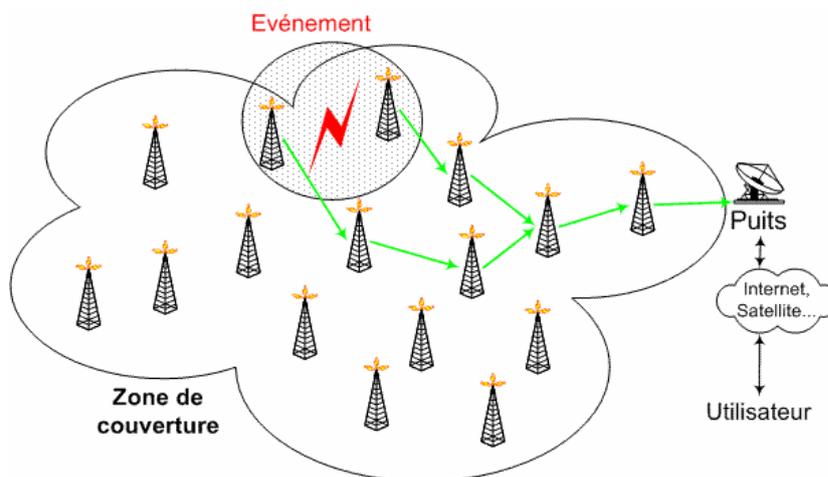


FIGURE 1.1 – L'architecture d'un RCSF [6].

1.3.3 Architecture d'un nœud capteur

L'architecture d'un capteur comprend deux parties : matérielle et système d'exploitation.

a) Partie matérielle

Un capteur est composé de 4 unités :

- **L'unité d'acquisition** : elle est composée d'un capteur qui va obtenir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui va convertir l'information relevée et la transmettre à l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement** : elle est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission.

- **L'unité de transmission** : elle est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.

Ces trois unités sont alimentées par une batterie (*unité d'énergie*) comme le montre la figure ci-dessous :

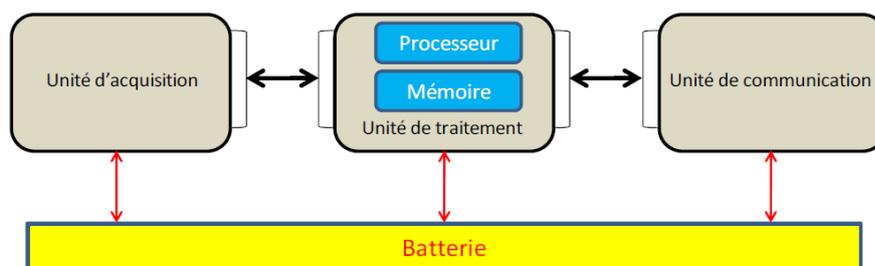


FIGURE 1.2 – L'architecture physique d'un capteur [6].

b) La partie système d'exploitation

Le système d'exploitation (*Operating System ou (OS)*) [6] 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 : TinyOS.

1.3.4 Caractéristiques d'un RCSFs

Les principales caractéristiques d'un réseau de capteur sans fil se résument dans ce qui suit :

- **Ressources limités** : Les capteurs sont des objets de communication de 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 [7].

- **Communication multi-saut** : Les ressources physiques limitées des nœuds capteurs leurs imposent des portées de transmission réduites, ce qui oblige les nœuds à router les informations à travers d'autres nœuds pour atteindre le nœud puits. En plus, la haute densité de déploiement des nœuds favorise l'utilisation de cette communication multi-saut qui consomme moins d'énergie que la communication traditionnelle à un seul saut [12].
- **Sécurités limitées** : Les principales caractéristiques des RCSFs rendent la sécurité très difficile à assurer. En effet, étant basés sur un déploiement dans des environnements hostiles, les réseaux de capteur sont plus sensibles aux attaques filaires. Quiconque possède un récepteur adéquat peut potentiellement écouter ou perturber les messages échangés. Notant que la puissance de calcul limitée des capteurs empêche l'utilisation des mécanismes cryptographiques résistants comme la cryptographie à clé publique [7].
- **Densité des nœuds** : Les réseaux de capteur se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission très fiable des données sur l'état de champ de capteur. Vu le nombre important de nœuds le coût de production d'un capteur doit être faible pour garantir la faisabilité du réseau [8].

1.3.5 Applications des RCSFs

Le domaine d'application des RCSFs est très varié [6]. Ces réseaux sont présents dans le domaine militaire, sécurité, médical, transport, environnemental, etc.

- **Applications militaires** : Les RCSFs permettent la détection des mouvements ennemis sur un champ de bataille ou bien de tracer leurs mouvements. De façon analogue, ils peuvent permettre la détection d'intrusion ou de cambriolage dans le domaine de la sécurité civile.



FIGURE 1.3 – Réseau de capteur militaire [6].

- **Applications environnementales** : la surveillance de l'environnement est un domaine où les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés. L'application classique est la détection des désastres tels que les feux de forêts. Dans une telle application, plusieurs capteurs sont déployés afin d'alerter les secours, d'évaluer les risques et de prendre les mesures nécessaires. Des capteurs peuvent également être déployés sur un terrain à des fins agricoles ou pour la surveillance des environnements hostiles tels que les volcans ou les régions toxiques.
- **Applications médicales** : Les RCSFs permettent par exemple la surveillance de l'état de santé des patients qu'ils soient au sein de l'établissement ou même ailleurs, et ce en permanence.

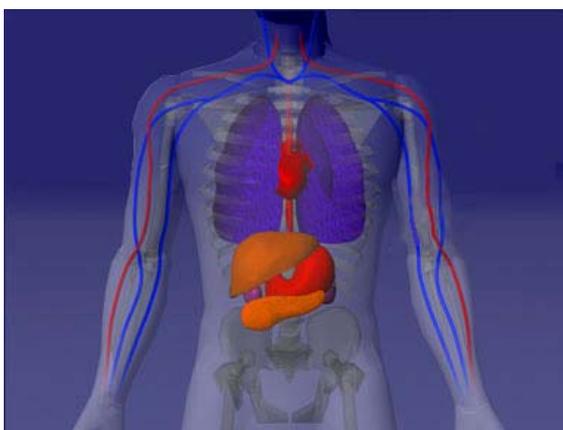


FIGURE 1.4 – Ensemble de capteurs dans un corps humain [6].

- **Applications dans la sécurité** : l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter des fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou un vieillissement de la structure. Avec une activation périodique de ces capteurs, le système peut fonctionner durant des années, voir des décennies.
- **Applications agricoles** : Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.



FIGURE 1.5 – Application agricole [6].

- **Applications domestiques** : En plaçant, sur le plafond ou dans le mur, des capteurs, on peut économiser l'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes.

1.3.6 Communication dans les RCSFs

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, en n'ayant aucune information sur la topologie globale même locale du réseau construit. Pour cela, les nœuds capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leur permettre de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, réagir aux données captées et transmettre ces données via une communication multi-sauts.

a) La pile protocolaire

Le rôle de cette pile consiste à standardiser la communication entre les nœuds participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits compatibles. Ce modèle comprend cinq couches : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique. Les couches ont les mêmes fonctions que celles de modèle OSI (*Open Systems Interconnection*) [8].

De plus, cette pile possède trois plans (*niveaux*) de gestion : le plan de gestion des tâches qui permet de bien affecter les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de mobilité qui permet de garder une image sur la localisation des nœuds pendant la phase de routage, et le plan de gestion d'énergie qui permet de conserver le maximum d'énergie.

Dans le but d'un établissement d'un RCSF, une architecture en couche est adoptée afin d'améliorer la robustesse du réseau. Une pile protocolaire est donc utilisée par les nœuds de réseau. Comme le montre la figure suivante :

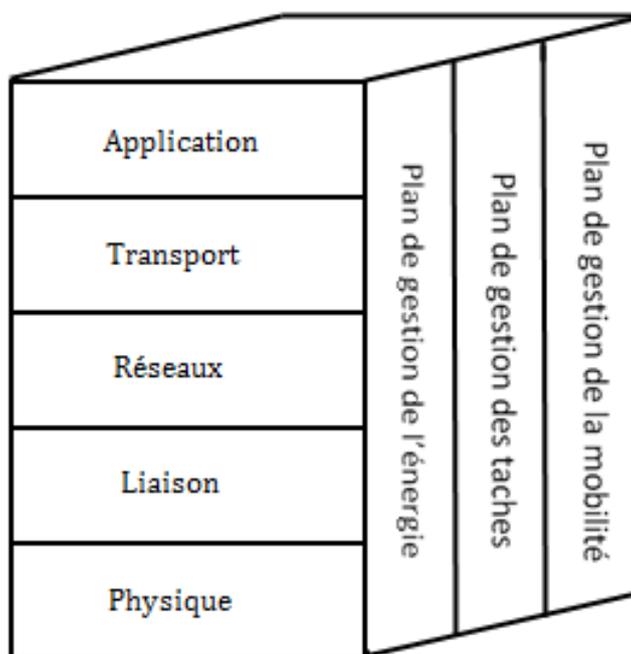


FIGURE 1.6 – La pile protocolaire dans les RCSFs [8].

- **La couche physique :**

S'occupe de la spécification du câblage, des fréquences porteuses, etc. Cette couche doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste [8].

- **La couche liaison :**

Elle spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds/routeurs dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs, de l'accès sur le média, elle assure la liaison point à point et point à multipoint dans un réseau de communication. Elle est composée de la couche de contrôle de liaison logique (*LLC pour Logiciel Link Control*) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments des messages de la couche réseau avec des informations d'entête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au médium (*MAC pour Medium Access Control*) qui contrôle la radio. Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les nœuds voisins [8].

- **La couche réseau :**

La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport : routage, relayage, etc. Le protocole de routage est le principal acteur dans cette couche, il permet de trouver une route et une transmission performante des données. Plusieurs nouveaux algorithmes de routage ont été conçus pour les problèmes de routage dans les réseaux capteurs (optimisation de l'utilisation de l'énergie des capteurs, gestion des trafics, etc).

- **La couche transport :**

Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission [8].

- **La couche application :**

Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, gère directement par les logiciels.

- **Le niveau de gestion d'énergie**

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par 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. 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 [8].

- **Le niveau de gestion de mobilité**

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

- **Le niveau de gestion des tâches**

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [8].

b) Types de communication dans les RCSFs

Le but d'un réseau de capteurs sans fil est la surveillance d'un environnement physique et la fourniture des informations capturées. Chaque nœud est équipé d'un ou plusieurs capteurs, par lesquels les données sont capturées et transportées à travers d'autres nœuds du réseau à la destination de données toute en utilisant les différents types de communications suivantes :

- *La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur* : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales [13].
- *La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire* : les données capturées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.
- *La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur* : les requêtes et la signalisation des messages sont souvent multicast. Elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires pour atteindre un sous-ensemble des nœuds immédiatement (communication directe).
- *La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire* : la communication entre ces nœuds est dans la plupart du temps unicast.

1.3.7 Facteurs de conception d'un réseau de capteurs sans fil

Nous allons introduire les facteurs les plus importants à prendre en compte dans la conception d'un RCSF. Ces facteurs sont un guide dans la conception et l'implémentation des protocoles des différentes couches protocolaires propre à ce type de réseau [10].

- **Tolérance aux fautes** :
La tolérance aux fautes est la capacité de soutenir les fonctionnalités d'un réseau de capteurs sans causer d'interruption lorsqu'un capteur cesse de fonctionner. Dans un réseau de capteur sans fil certains capteurs peuvent tomber en panne ou bloquer du fait de l'épuisement de leurs batteries ou à cause d'un facteur environnemental. Les pannes des nœuds capteurs ne doivent pas affecter le bon fonctionnement du réseau.
- **Scalabilité (*passage à l'échelle*)** :
Le nombre de capteurs déployés peut être de l'ordre de la centaine ou de millier. Le réseau doit donc être capable de fonctionner efficacement avec une grande quantité de capteurs. De plus, les nœuds doivent

traiter un grand nombre d'événements sans être saturé.

- **Coût de production :**

Le coût de production d'un seul capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau car ces réseaux sont constitués d'un grand nombre de nœuds capteurs ce qui rend le prix d'un nœud très critique. Si ce dernier est très coûteux, alors le coût de réseau sera très élevé et non maniable. Pour cela le coût d'un capteur ne doit pas être cher afin d'avoir un coût global d'un réseau raisonnable.

- **Contraintes matérielles :**

Un capteur peut contenir en plus des quatre unités de base, d'autres unités dépendantes de l'application du réseau, comme l'intégration d'une unité consacrée à la localisation ou bien un système de mobilisation pour les déplacés en cas de nécessité.

- **Topologie dynamique :**

La mobilité des nœuds, la possibilité d'étendre le réseau par ajout de nouveaux nœuds et la suppression des nœuds défaillants changent fréquemment la topologie de réseau. Ceci nécessite une maintenance permanente pour assurer le bon fonctionnement de réseau de capteur.

- **Consommation d'énergie :**

Un capteur, de part, sa taille est limitée en énergie. Dans la plupart des cas, le remplacement de la batterie est impossible, ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de sa batterie. Les chercheurs actuels se concentrent principalement sur les moyens d'optimisation de la consommation d'énergie par les nœuds capteur.

- **Qualité de service :**

Dans divers applications, la donnée doit être transmise dans une certaine plage de temps, sinon elle devient caduque. Pourtant dans la plupart des applications la durée de vie du réseau est favorisée au détriment de la qualité d'émission des données. Selon les applications utilisées, les réseaux de capteurs doivent assurer un niveau de qualité

de service minimum afin de répondre aux besoins des utilisateurs finaux.

1.4 Conclusion

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

Dans ce premier chapitre, nous avons essayé de mettre le point sur l'architecture des RCSFs, ainsi que leurs principaux domaines d'application, leurs facteurs de conception et leurs caractéristiques, etc. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs compliquent la gestion de ce type de réseaux ce qui nous a mené à faire une étude sur le routage dans les RCSFs dans le chapitre qui suit.

Routage dans les RCSFs

2.1 Introduction

Dans les réseaux de capteurs, l'énergie consommée pendant la communication est un facteur très important. Une des conditions les plus importantes des réseaux de capteurs est de réduire cette consommation d'énergie. Pour cela, nous avons besoin d'une technique ou d'un protocole de routage qui augmentera la durée de vie de réseau.

Le routage est considéré comme étant un service important, il permet l'acheminement des paquets de données captées à partir de nœuds capteurs vers la station de base. Le choix du chemin se fait selon certains critères de performance tels que la consommation en énergie, la fiabilité, le délai de transmission, etc.

Dans ce chapitre nous présentons le routage à consommation d'énergie minimale ainsi que les différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Il est organisé de la façon suivante : nous présentons les quatres approches qui permettent le choix de la route à consommation d'énergie minimale par la suite nous décrivons les différentes approches de routage dans ce type de réseau en citons un exemple de protocole pour chacune d'elles.

2.2 Routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs sans fil, le choix de la route à consommation d'énergie minimale peut suivre quatres approches. Pour décrire chacune

d'elles, nous utiliserons *la Figure 2.1* où le nœud T sera considéré comme nœud capteur source qui surveille le phénomène. Chaque nœud intermédiaire est caractérisé par la valeur PA qui désigne l'énergie disponible au niveau du nœud. De la même manière, chaque liaison entre deux nœuds est caractérisée par l'énergie α_i nécessaire pour transmettre un paquet de données entre les deux extrémités [1].

Pour transmettre un paquet du nœud T au nœud puits, 4 routes sont possibles :

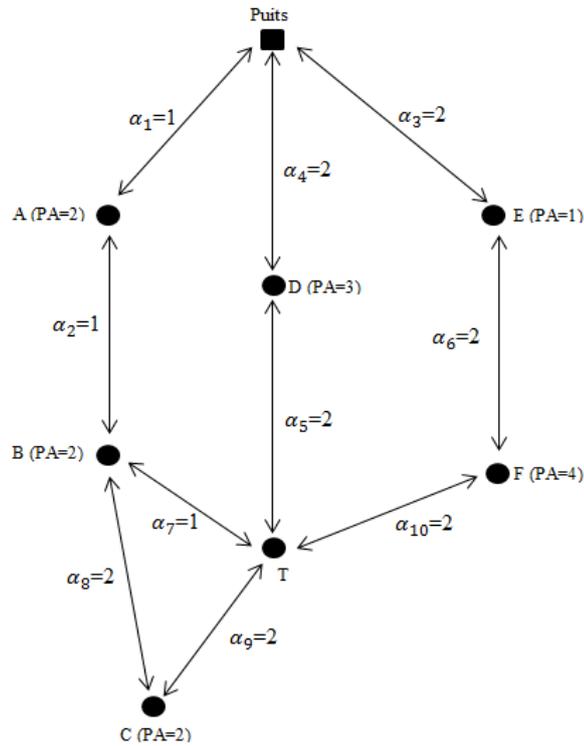


FIGURE 2.1 – Routes efficaces en consommation d'énergie [1].

- **Route 1** : puits – A – B – T, avec l'énergie totale disponible $PA = 4$ et l'énergie totale nécessaire $\alpha = 3$.
- **Route 2** : puits – A – B – C – T, avec l'énergie totale disponible $PA = 6$ et l'énergie totale nécessaire $\alpha = 6$.
- **Route 3** : puits – D – T, avec l'énergie totale disponible $PA = 3$ et l'énergie totale nécessaire $\alpha = 4$.
- **Route 4** : puits – E – F – T, avec l'énergie totale disponible $PA = 5$ et l'énergie totale nécessaire $\alpha = 6$.

2.2.1 Route à énergie disponible maximum.

La première approche pour le choix des routes efficaces en consommation d'énergie consiste à prendre celle qui contient les nœuds possédant, ensemble, un maximum d'énergie totale disponible. Cette quantité est égale à la somme des énergies PA de chaque nœud appartenant à cette route.

En se basant sur cette approche, la route 2 est sélectionnée dans l'exemple de la Figure 2.1. Néanmoins, on remarque, tous de suite, que cette route contient les nœuds de la route 1 en plus du nœud C . Cette route ne peut pas être la plus efficace en consommation d'énergie malgré qu'elle possède le maximum d'énergie totale disponible.

Par conséquent, il est important, dans un algorithme de routage, de ne jamais considérer comme alternatives les routes qui peuvent être déviées par extension de celles allant du nœud capteur vers le nœud puits. L'élimination de la route 2 alors à choisir la route 4 comme route efficace en consommation d'énergie suivant la première approche [1].

2.2.2 Route à énergie de transmission minimum

Cette approche consiste à choisir la route qui consomme le minimum d'énergie pour transmettre un paquet entre le nœud capteur et le nœud puits. Suivant l'exemple, la route 1 est celle qui consomme le minimum d'énergie [1].

2.2.3 Route à nombre de sauts minimum

La route sélectionnée est celle qui traverse un nombre minimum de nœuds intermédiaires pour atteindre le nœud puits. Dans le cas de l'exemple de la Figure 2.1, la route 4 est celle qui est la plus efficace suivant ce schéma de sélection.

Il est à noter que, les deux approches de "*routes à sauts minimum*" et "*routes à énergie de transmission minimum*" sélectionnent les mêmes chemins quand les énergies de transmission α_i sont identiques [1].

2.2.4 Route à nœud ayant le maximum des minimums des énergies disponibles

Cette approche favorise la route dans laquelle l'énergie disponible minimum traversée est plus grande que toutes les autres énergies disponibles minimums des autres routes. Dans la figure 2.1, la route 3 est celle qui est favorable pour cette approche, la route 1 vient après.

La stratégie de ce schéma de sélection évite l'utilisation du nœud qui a une faible énergie disponible pour lui assurer une durée de vie plus longue [1].

2.3 Protocoles de routage dans les RCSFs

Dans les réseaux ad hoc, trois grandes familles d'approches de routage peuvent être distinguées : **protocoles proactifs**, **protocoles réactifs** et **protocoles hybrides**. Les protocoles proactifs anticipent la demande d'acheminement des paquets, ou chaque nœud maintient les informations concernant tous les autres nœuds du réseau dans des tables de routage qui sont mis à jour périodiquement. Alors que, les protocoles réactifs réagissent à une demande d'acheminement en calculant la route suite à cette requête. En combinant ces deux approches, on obtient la famille des protocoles hybrides qui possèdent des propriétés à la fois de proactivité et de réactivité, de telle sorte que le réseau est décomposé en un ensemble de zones. Le routage à l'intérieur des zones est assuré par un protocole de routage proactif, tandis que le routage entre les zones est réalisé par un protocole de routage réactif.

Pour les réseaux de capteur, plusieurs approches de routage ont été proposées [18]. Les protocoles publiés dans ce domaine ont été largement étudiés et peuvent être classifiés selon plusieurs critères. Al-Karaki et Al [18] ont proposé une classification (*la plus citée dans la littérature*) à ces différents protocoles. Ces derniers sont classés selon leurs principes de fonctionnement, la structure du réseau et l'initiateur de communication.

2.3.1 Protocoles basé sur la structure du réseau

Cette section décrit différents protocoles de routage basés sur la topologie du réseau et les informations d'emplacements géographiques des capteurs. Ces protocoles sont divisés en trois classes : routage à plat, routage hiérarchique (*basé clustering*) et routage géographique (*basé localisation*), comme

le montre la Figure suivante :

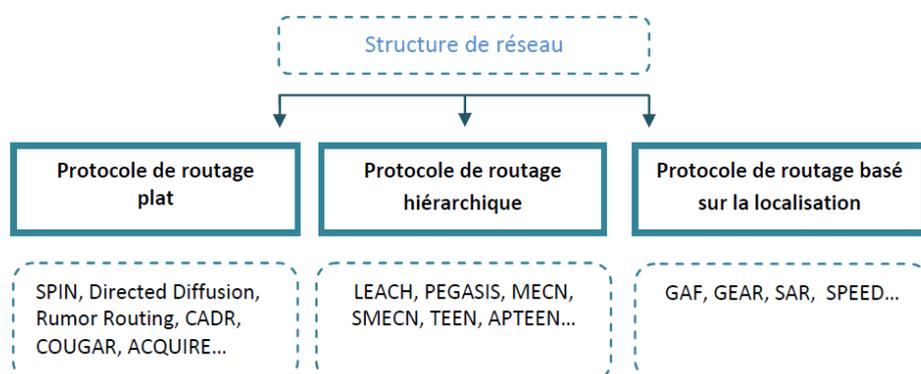


FIGURE 2.2 – Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau [18].

1. Routage à plat

Le routage à plat [19] est le modèle le plus simple où chaque nœud dans le réseau transmet ces paquets de données à la station de base. Dans cette technique de routage, tous les capteurs sont égaux et jouent les mêmes rôles, tels que la collecte de données et la communication avec sink, c'est à dire toutes les données recueillies dans la région éloignée peuvent être identiques ou dupliquées sur tous les nœuds de capteurs fonctionnent de la même manière.

• Avantages

- *Scalabilité* : les réseaux à plat sont scalables de faite que chaque nœud participe également à la tâche de routage et puisque les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- *La simplicité* : le routage à plat est très simple dans son fonctionnement et les protocoles à plat ne nécessitent pas beaucoup de communication pour établir des routes. Ces dernières, sont généralement formées uniquement dans des régions où il y a des données à transmettre.
- *L'agrégation de donnée* : les protocoles à plat offrent la possibilité d'agrégation des données. Cette opération s'effectue par les nœuds capteurs qui se trouvent sur le chemin de routage vers la destination, où les données des autres nœuds voisins sont accumulées avec

une élimination de redondance.

- **Inconvénients**

- Selon l'architecture plate du réseau, les nœuds proches de la station de base vont participer plus que les autres, et donc vont épuiser leurs énergies beaucoup plus rapidement que les autres nœuds capteurs. Ce phénomène est connu sous le nom de points chauds (*Hot-Spots*).
- Le routage à plat exige que tous les nœuds opèrent de la même façon et d'une manière distribuée, ce qui nécessite un grand nombre de messages de contrôle pour le bon fonctionnement des protocoles et la maintenance de la topologie.

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

Directed diffusion est un protocole réactif qui est simple dans son principe, permet d'utiliser plusieurs chemins pour le routage des informations. Son principe de fonctionnement est le suivant : Le nœud « sink » commence à envoyer, vers tous les nœuds, un message *Interest* pour démarrer une application bien déterminée. Ce paquet sera acquitté par un autre appelé *gradient*. Un gradient est un lien de réponse de la part du voisin recevant l'intérêt. En utilisant les intérêts et les gradients [15], plusieurs chemins peuvent être établis entre le « sink » et la source. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue, un nouveau ou un alternatif doit être identifié, puisque les données sont demandées par des requêtes. En outre, cette méthode est coûteuse en termes de consommation d'énergie et ne représente pas un bon modèle pour WSN (Wireless Sensor Network). Le Figure 2.3 suivante illustre les phases de fonctionnement de ce protocole.

Sachant que :

- (a) propagation de l'intérêt.
- (b) construction des gradients initiaux
- (c) livraison des données par renforcement.

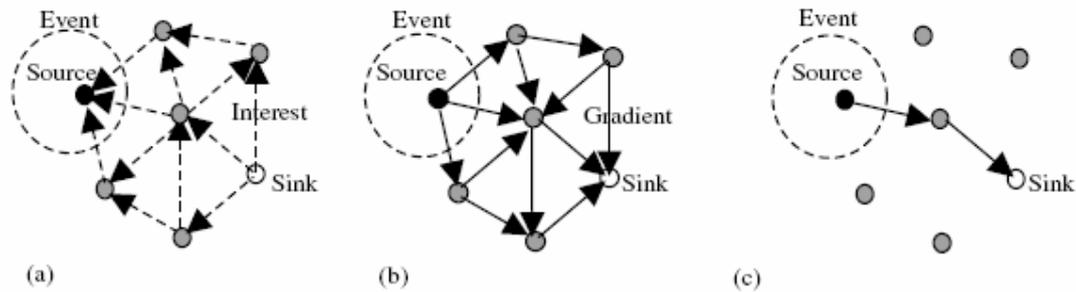


FIGURE 2.3 – Phases de communication du protocole Directed Diffusion [15].

2. Routage hiérarchique

Le routage hiérarchique [20] est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique. Il se base sur le concept (*nœud standard - nœud maître*) où les nœuds standards acheminent leurs messages à leurs maîtres, lesquels les acheminent ensuite dans le réseau tout entier via d'autres nœuds maîtres jusqu'à la station de base (*sink*).

- **Avantages**

- *L'agrégation de données* : l'avantage de routage hiérarchique est que les données du cluster entier peuvent être combinées par le cluster-head et envoyées vers la destination.

- **Inconvénients**

- *Points chauds (Hot-Spots)* : les nœuds élus comme des cluster-heads consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau.

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

C'est l'un des protocoles hiérarchiques les plus populaires pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds capteurs en se basant sur la puissance du signal reçu et prendre comme routeur vers le puits, le cluster-head local. Cela économisera de l'énergie puisque seul les cluster-head effectueront une transmission vers le puits. Le

nombre optimal de cluster-head dans un réseau de capteurs est de 5% par rapport au nombre total de nœuds. Tous les processus de données tel que la fusion et l'agrégation sont locaux au cluster. Le cluster-head est élu périodiquement en fonction de son niveau d'énergie pour équilibrer la consommation d'énergie des nœuds. Le cluster-head est élu durant une période de temps appelé round. Les nœuds choisissent un nombre réel entre 0 et 1. Le nœud devient le cluster-head dans ce round si le nombre est inférieur au seuil suivant :

$$T(\mathbf{n}) = \begin{cases} P/(1 - P * (r \bmod 1/p)) & \text{si } \mathbf{n} \text{ n'appartient pas à } G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où P est le pourcentage désiré de cluster-head.

r est le round en cour.

n est l'ensemble des nœud qui n'ont pas était cluster-head dans les derniers $(1/P)$ rounds.

G est l'ensemble des nœuds du cluster.

LEACH apporte un facteur de sept dans la réduction de la consommation d'énergie comparé à Directed Diffusion et un facteur de quatre à huit comparé au protocole de routage sensible à l'énergie (*Energy Awar Protocol*) [16]. Le clustering dynamique augmente la durée de vie du réseau. LEACH est totalement distribué et n'a besoin d'aucune connaissance globale du réseau. Cependant LEACH utilise un routage à saut unique où chaque nœud peut transmettre directement au cluster-head et au puits. Mais il n'est pas applicable aux réseaux qui sont déployés sur une grande surface. De plus, le clustering dynamique ajoute une grande surcharge comme le changement des cluster-head ce qui peut diminuer le gain en énergie [16].

3. Routage géographique (*basé sur la localisation*)

Dans ce type de routage [20], les nœuds capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base des forces entrantes de signal. Des coordonnées relatives des nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant une telle information entre les voisins. Alternativement, la location 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.

- **Avantages**

- L'utilisation des GPSs permet d'améliorer la connaissance de la position au centimètre près. Des traitements de signal dans des récepteurs plus sophistiqués permettent d'améliorer la perception de positionnement (*résolution de la distance*).
- Dans le routage basé localisation géographique, la région de sensation est connue et la requête peut être donc dirigée uniquement vers cette région, ce qui éliminera le nombre de transmission de manière significative.

- **Inconvénients**

- Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- Le routage basé sur la localisation géographique n'est pas un bon choix pour les applications qui exigent une livraison fiable à des intervalles réguliers des paquets de données.

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

L'idée est de restreindre le nombre d'intérêts dans la diffusion dirigée en considérant seulement certaines régions plutôt que d'envoyer les intérêts au réseau tout entier. Le routage géographique suppose que tous les nœuds connaissent leurs positions. Une solution basée sur le GPS peut être trop coûteuse, d'autant plus que le nombre de nœuds à équiper est très grand.

2.3.2 Protocoles basés sur l'initiateur de la communication

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

1. Communication lancé par la source

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 donnée dirigés par les événements ou dirigés par le temps (*périodiques*). Soit la donnée est envoyée à intervalle de temps régulier ou alors elle est envoyée quand les nœuds capturent une certaine valeur (*détection d'un événement*).

- **Avantages**

- L'efficacité énergétique dû à l'absence des requêtes qui consomme beaucoup d'énergie générées par le nœud puits.

- **Inconvénients**

- Les capteurs doivent avoir des informations sur le chemin qui conduise au nœud puits.
- Pour cette approche l'énergie n'est pas la seule préoccupation, des exigences de QoS doivent être respectées (*latence, fiabilité*).

- **Exemple : DD**

2. Communication lancé par la destination

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

- **Avantages**

- L'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puits élimine les transmissions inutiles.

- **Inconvénients**

- La circulation des messages requêtes de grande taille tend à épuiser les batteries des capteurs.

- **Exemple : GEAR.**

2.3.3 Protocoles basés sur le fonctionnement des protocoles

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles [20]. Selon le fonctionnement et les avantages visés par les protocoles, quatre classes de routage peuvent être distinguées : routage basé sur la qualité de service, routage multi-chemins, routage basé sur la négociation et routage basé sur le flux de données.

1. Routage basé sur la qualité de service

Les protocoles de routage basés sur la QoS sont utilisés dans les applications qui ont des exigences temps-réel. Par exemple, dans le domaine de la sécurité, la détection d'intrusion doit être acheminée au plus bref délai vers le nœud puits. Ce type de protocoles essaye de répondre à quelques exigences de qualité de service (*délais de transmission ou niveau de fiabilité*) et doit faire l'équilibre avec la consommation d'énergie [17].

- **Avantages**

- La prise des délais de transmission rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications de surveillances *centre nucléaire, applications militaires, etc.*
- La qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions.
- L'augmentation du taux d'arrivée des paquets au nœud puits.

- **Inconvénients**

- L'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.

- **Exemple : SAR (*Sequential Assignment Routing*)**

SAR [22] est considéré parmi les premiers protocoles élaborés pour les réseaux de capteurs. Il prend en considération la consommation d'énergie et la qualité de service lors de la prise de décision sur chaque route candidate pendant le processus de routage. Une approche multi-chemins (*classe détaillée plus tard*) est utilisée pour éviter la défaillance d'une route. Cela est possible à travers la création d'un arbre avec multiples chemins reliant le nœud source au destinataire. Ainsi, à partir de chaque nœud jusqu'au nœud puits, plusieurs arbres d'une longueur d'un saut de ce nœud sont initialement construits. Chaque arbre est par la suite développée en allant successivement du nœud puits vers les autres nœuds, tout en évitant ceux qui ont les valeurs faibles de QoS et d'énergie disponible. A la fin de ce processus, chaque nœud fera partie des chemins multiples et pourra savoir le nœud voisin a utilisé pour transmettre les messages. SAR dépend de trois facteurs : les ressources énergétiques acquises, la QoS dans chaque chemin, et le niveau de priorité des paquets. De ce fait, les chemins de l'arbre prennent en compte les métriques QoS, la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. Une ou plusieurs routes peuvent alors être empruntées. Un processus de calcul de chemins est relancé périodiquement par le nœud puits afin de prendre en compte tout changement dans la topologie du réseau.

2. Routage basé sur la négociation de données

Ces protocoles emploient des descripteurs de données à un niveau élevé afin d'éliminer la transmission des données redondantes sur la base de la négociation. Des décisions de communication sont également prises sur la base des ressources disponibles au niveau des nœuds capteurs. Donc, l'idée principale de routage via la négociation est de supprimer l'information double et d'empêcher l'envoi des données redondantes

au prochain capteur ou à la station de base, en échangeant une série de messages de négociation avant même la transmission effective des données [19].

- **Avantages**

- Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises.

- **Inconvénients**

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.
- Le scénario de négociation entre les nœuds (*déterminer les données et les acheminer*) produit un retard pour délivrer les données aux nœuds.

- **Exemple : SPIN (*Sensor Protocol for Information Negotiation*)**

La famille de protocole SPIN est un bon exemple illustratif du routage basé sur la négociation. L'idée derrière le SPIN est de nommer les données en utilisant des descripteurs de haut niveau ou des métas données. Avant la transmission, les méta-données sont échangées entre les capteurs par un mécanisme de publicité de données. Chaque nœud recevant de nouvelles données, l'annonce à ses voisins et ceux intéressés récupèrent les données en envoyant une requête (*Figure 2.4*).

Le protocole SPIN suit les étapes suivantes :

- Le nœud A annonce ses données au nœud B (a).
- B répond par une requête (b).
- B reçoit les données requises (c).
- B fait de la publicité à ses voisins (d) qui répondent par des requêtes (e-f).

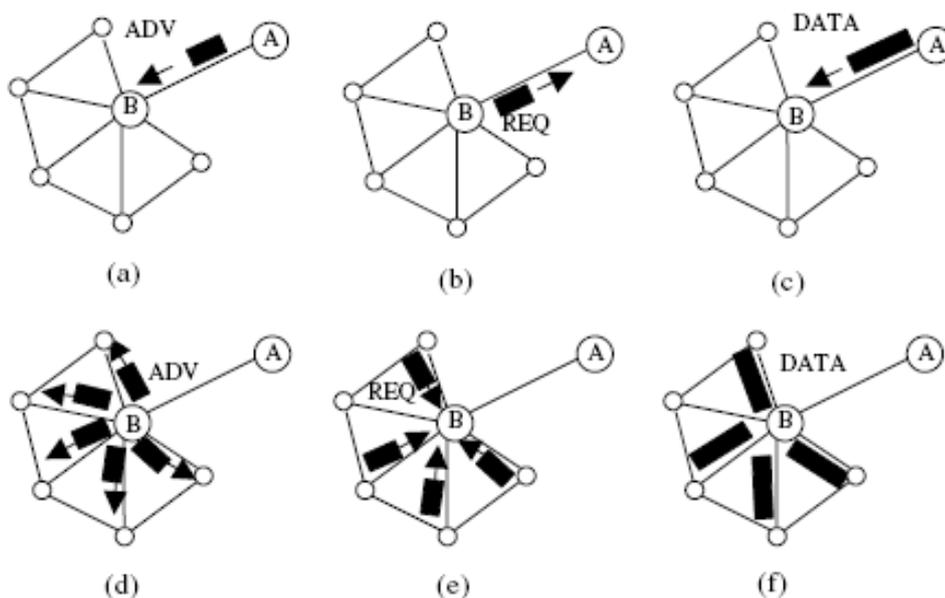


FIGURE 2.4 – le protocole SPIN.

Fonctionnement de SPIN

Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.

3. Routage multi-chemins

Le routage basé multi-chemin est devenu une technique prometteuse dans les RCSFs. Le déploiement dense de nœuds de capteurs permet de construire plusieurs chemins entre chaque nœud capteur et le sink, technique utilisée par des applications avec différents objectifs : amélioration de la fiabilité de transmission des données, fourniture d'un routage tolérant aux pannes, contrôle le support de la qualité de service

dans RCSF [20].

- **Avantages**

- Un mécanisme d'équilibre de charge peut être utilisé pour la réparation du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des intermédiaires (*énergie*) et le débit sur les liens.
- L'augmentation de la fiabilité de la robustesse par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination.

- **Inconvénients**

- L'utilisation de plusieurs chemins nécessite de les maintenir actifs, ce qui consomme énormément d'énergie.
- Le risque de perte de paquets augmente dans le cas où ces derniers ont envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.

- **Exemple : DD**

4. 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.

- **Avantages**

- L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.
- 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.
- La répartition du trafic de façon à assurer l'équité en consommation d'énergie entre les nœuds.

- **Inconvénients**

- Des informations sur la topologie sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grande échelle.
- Cette approche est valable pour les RCSFs à des topologies spécifiques (*par exemple : un seul nœud origine*).
- Les protocoles ne précisent pas comment les chemins sont établis.

- **Exemple : RR (*Rumor Routing*)**

L'idée est de transmettre les requêtes aux nœuds qui ont observé un événement particulier. Quand un nœud détecte un événement, il l'ajoute à sa table locale et génère un paquet nommé agent. Ce paquet parcourt le réseau afin de propager des informations sur les événements locaux aux nœuds distants. Quand un nœud génère une requête pour un événement, les nœuds qui connaissent l'itinéraire, peuvent répondre en se référant la table d'événement.

2.4 Conclusion

Le routage dans les réseaux de capteurs est un problème complexe. Ceci est dû, d'une part, à ces protocoles qui peuvent varier suivant les différentes approches de routage, et d'autre part, les solutions de routage proposées dans le cas des réseaux ad hoc ne sont pas applicables directement dans les réseaux de capteurs. Bien que l'objectif principal reste le même, c'est-à-dire : trouver la façon la plus simple d'acheminer les paquets d'une source vers une destination, le routage dans les réseaux de capteurs tolère une certaine négligence des paramètres de QoS en ne tenant compte que de la minimisation de la consommation d'énergie. Les recherches modernes ont mené à des nouveaux protocoles conçus spécialement pour les RCSFs. Cependant, la conception de ces protocoles de routage doit prendre en considération les caractéristiques de ce type de réseau ainsi que les exigences des applications pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

Ce chapitre nous a donné une vue globale sur la consommation d'énergie ainsi que identifié et classifié quelques protocoles de routage pour les RCSFs

proposés dans la littérature. D'une façon générale, ces protocoles sont classifiés selon la structure de réseau, l'initiateur de communication et le fonctionnement des protocoles.

La prochaine phase de notre travail est consacrée à l'étude détaillée de l'approche de routage multi-chemins ainsi que définir ses différentes classes tout en proposant une nouvelle classe sur laquelle s'appuient notre étude . Cela nécessite une étude critique de quelques protocoles de routage de chaque classe et définir leurs avantages et inconvénients.

Routage multi-chemins dans les RCSFs

3.1 Introduction

Un réseau de capteur sans fil est caractérisé par les changements fréquents de topologie du réseau, la limitation de la bande passante disponible, et la limitation de puissance des batteries des nœuds. La topologie d'un RCSF change fréquemment car les nœuds dans ce réseau sont capables de se déplacer collectivement ou individuellement et de manière imprévisible. Ces caractéristiques rendent le routage dans ce type de réseau complexe, ce qui a poussé les chercheurs à s'intéresser aux problèmes d'amélioration de routage dans ce réseau, d'où la naissance de plusieurs mécanismes de routage. Parmi ces mécanismes, le multi-chemins (*le multi-path*) est utilisé par plusieurs protocoles pour éviter des retards inutiles lors des ruptures de lien.

Dans ce chapitre, nous commençons avec une définition du routage multi-chemins, ses principaux objectifs ainsi que la classification des protocoles de routage multi-chemins et en terminons par un tableau comparatif des protocoles étudiés.

3.2 Routage multi-chemins

3.2.1 Définition

L'approche du routage multi-chemins a été l'une des directions courantes les plus importantes dans le domaine du routage. Le concept du routage multi-chemins consiste à trouver pour chaque nœud source un multiple choix de chemins lui permettant d'atteindre une destination particulière.

Les chemins multiples peuvent être utilisés soit alternativement c'est-à-dire à un moment donné un seul chemin sera choisi, ou simultanément en utilisant plusieurs chemins en même temps [3]. Ces chemins peuvent aussi être classés en trois catégories principales à savoir : les chemins à nœuds disjoints, à liens disjoints et non disjoints qui seront évoquées par la suite [3] :

a) **Chemins à nœuds disjoints**

On les appelle aussi des chemins totalement disjoints, ils ont ni nœuds ni liens en commun, ils assurent une bonne fiabilité par rapport aux chemins non disjoints et à liens disjoints. En effet, avec des chemins à nœuds disjoints, quand un nœud tombe en panne ou un lien est brisé, c'est un seul chemin qui sera défaillant, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres types.

b) **Chemins à liens disjoints**

Ce sont des chemins qui n'ont aucun lien en commun mais peuvent avoir des nœuds en commun.

c) **Chemins non disjoints**

Ce sont des chemins qui peuvent avoir des nœuds ou des liens en commun. Leur principal avantage est qu'ils sont faciles à découvrir parce qu'ils n'ont aucune contrainte. La Figure 3.1 illustre ces trois types de chemins.

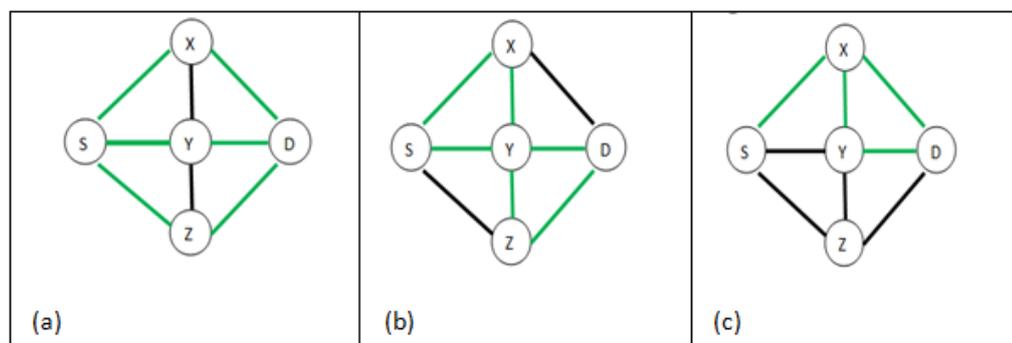


FIGURE 3.1 – Types de chemins dans le routage multi-chemins [3].

A partir de cette figure on remarque que :

- Dans (a), SXD, SYD, et SZD sont des chemins à nœuds disjoints.
- Dans (b), SXYZD et SYD sont des chemins à liens disjoints.
- Dans (c), les chemins SXD et SXYD ne sont pas disjoints.

3.2.2 Objectifs du routage multi-chemins

Le routage multi-chemins a été étudié pour répondre à différents objectifs, notamment la gestion du réseau. Dans ce qui suit, nous décrivons certaines caractéristiques du routage multi-chemins qui améliorent les performances des réseaux de capteurs.

1. Fiabilité et tolérance aux défaillances

La fiabilité peut être définie par la probabilité qu'un message généré à un point du réseau soit réellement routé vers une destination considérée. En raison des caractéristiques des liens sans fil, de la topologie réseau dynamique et des interférences, la fiabilité de transmission de données dans les RCSFs est une tâche difficile [30]. L'idée originale de l'utilisation de l'approche du routage multi-chemins dans ce type de réseau est fournir de la tolérance aux défaillances des nœuds ou des liens dans un chemin et d'assurer la fiabilité de transmission de données.

2. Equilibrage de charge et consommation d'énergie

A cause des ressources limitées des nœuds capteurs, dans un routage multi sauts à chemin unique, la perte de quelques nœuds, qui peut être à l'épuisement de l'énergie, peut causer un changement de topologie significatif, ce qui influence sur le fonctionnement du réseau et donc sur sa durée de vie [23]. A cet effet, les approches de routage multi-chemins peuvent fournir une meilleure solution pour la distribution du trafic réseau sur plusieurs nœuds capteurs, afin d'équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds et prolonger la durée de vie de réseau.

3. Qualité de service

Un objectif important du routage multi-chemins est de fournir la qualité du service, plus précisément, la réduction des délais de livraison

des paquets de bout en bout, éviter la congestion, etc.

4. Sécurité

L'approche multi-chemins améliore la sécurité de la communication qui est une caractéristique très importante pour les réseaux. L'idée de base consiste en la transformation ou la division d'un message secret en plusieurs parties (sous-messages) en utilisant l'une des méthodes de cryptographie.

3.3 Classification des protocoles de routage multi-chemins

En se basant sur l'approche de sélection de routes, nous pouvons classer les protocoles de routage multi-chemins en quatre classes : 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, comme la montre la Figure 3.2

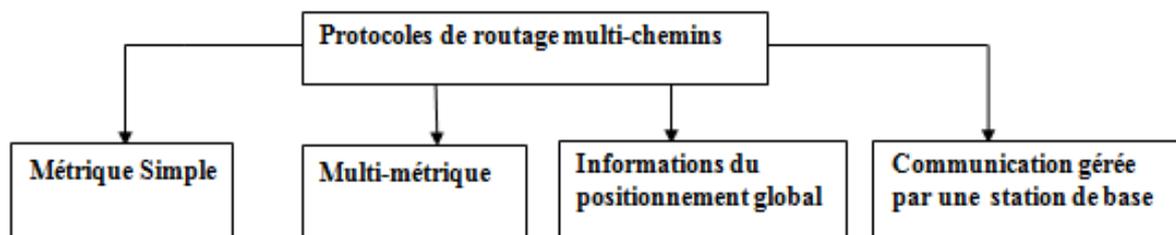


FIGURE 3.2 – Classification des protocoles de routage multi-chemins [5].

3.3.1 Routage basé sur une métrique simple

Cette classe de protocoles sélectionne les multiples chemins en se basant sur un seul critère tel que le nombre de sauts.

- **Exemple : protocole MMRE-AOMDV (*Maximal Minimal Residual Energy Ad hoc On demand Multi-path Distance Vector*)**

Est un protocole de routage qui exploite le maximum des minimums des énergies résiduelles des nœuds et utilise. Il établit un équilibrage de la consommation d'énergie entre les nœuds du réseau [25]. Ce protocole a deux principaux objectifs :

- Trouver l'énergie résiduelle minimale des nœuds pour chaque chemin pendant la découverte des chemins.
- Trié l'énergie résiduelle des nœuds par un trie croissant et utilise le chemin avec énergie résiduelle maximum pour transmettre les paquets de données.

- **Avantages**

- Le protocole MMRE-AOMDV utilise que la route optimale en terme de consommation énergétique

- **Inconvénients**

- Il est limité en terme d'utilisation des routes car il utilise que les nœuds à lien disjoint .

3.3.2 Routage multi-métrique

Dans cette classe, les protocoles de routage sélectionnent les chemins répondants à plusieurs critères : durée de vie, délai, etc.

- **Exemple : Protocole ILR (*Improving Lifetime and Reliability in Routing Real Time Wireless Sensor Networks based on Hybrid Algorithm*)**

S.Naziri et al. ont proposé une solution de routage hybride pour augmenter la fiabilité et la durée de vie d'un RCSF [5]. Cette proposition est une combinaison entre une solution basée sur un algorithme génétique et une autre solution pour sauvegarder les routes afin de permettre plus de fiabilité. L'algorithme génétique maintient une population générée aléatoirement sur laquelle il emploie les opérateurs

génétiques et mutation pour générer de nouvelles générations selon une fonction. Les routes optimales sont sauvegardées pour une éventuelle demande de route, ce qui réduit la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau. De plus, lorsqu'il y'a un échec de l'une de ses routes et le paquet de donnée est perdu, il est récupéré à partir des buffers des nœuds intermédiaires qui sauvegardent le paquet. Ceci évite une réémission du paquet par la source. Cependant, cette solution étant basée sur l'algorithme génétique, est inadaptée aux capacités limitées des RCSFSs.

- **Avantages**

- ILR augmente la durée de vie d'un RCSF par l'optimisation de la consommation d'énergie.

- **Inconvénients**

- Le risque de perte des paquets de données lors d'un échec de transmission.

3.3.3 Routage basé sur la position globale

La sélection des chemins dans cette classe de protocole est caractérisée par l'exigence des informations de positionnement global précises.

- **Exemple : protocole MMSPEED (*Multi-Path Multi-SPEED Protocol*)**

Ce protocole est une extension de SPEED [7], afin de supporter deux paramètres de QoS combinés, à savoir la ponctualité et la fiabilité dans l'acheminement des paquets. La ponctualité est garantie en prévoyant différents niveaux de vitesse de livraison des paquets.

Les nœuds intermédiaires peuvent élever le niveau de vitesse actuel, s'ils jugent que le paquet risque de consommer inutilement son échéance et qu'il peut atteindre sa destination à temps, si on lui accorde une vitesse de niveau supérieur. Par contre, la fiabilité est assurée par l'utilisation de chemins multiples de routage. Selon la probabilité de fiabilité exigée d'un paquet, chaque nœud peut transmettre des copies multiples du

paquet à un groupe de voisins candidats pour réaliser le niveau de fiabilité désiré.

- **Avantages**

- Ce protocole augmente la vitesses de transmission.
- La possibilité d'établissement de plus qu'un chemin vers la destination.

- **Inconvénients**

- La consommation inutile d'énergie lors d'utilisation d'une vitesse de niveau supérieur.

3.3.4 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, de choisir la route optimale en terme de coût énergétique.

1. Protocole MPSR (*Multi-Path Source Routing Protocol*)

MPSR [11] est un protocole de routage réactif donnant une architecture maillée au réseau. Ce protocole est adapté aux réseaux ad hoc (*resp. réseaux de capteurs*) ayant une station de base. Cette dernière a la charge de récupérer des données disponibles au niveau des stations qui constituent le réseau. MPSR doit être robuste par rapport à la mobilité et à la variation de la topologie du réseau. Le protocole MPSR agit en trois étapes pour établir des routes entre une station source (*un capteur*) et la station destination (*la station de base*).

- Dans la première étape, la station source diffuse dans le réseau un paquet de signalisation RREQ. Ces paquets sont retransmis par toutes les stations du réseau jusqu'à ce qu'un ou plusieurs paquets atteignent la destination recherchée, en l'occurrence la station de base en utilisant des routes différentes.

- Dans la seconde étape, la station destination calcule un poids pour chaque route découverte suivant un algorithme.
- Dans la dernière étape, la destination répond à la source par un RREP qui utilisera la route inverse par où est passé le paquet RREQ. Le paquet RREP a pour objectif d'informer la source des différents poids affectés pour chaque route.

L'exploitation des routes multiples par MPSR lui permet d'être efficace en terme énergétique. En plus MPSR utilise des paquets de données de taille assez grande, ce qui influence sur son efficacité énergétique.

- **Avantages**

- MPSR est robuste par rapport à la mobilité et à la variation de la topologie du réseau.

- **Inconvénients**

- Ce protocole utilise des paquets de données de taille assez grande, ce qui influence sur son efficacité énergétique.

2. Protocole EASIMP (*Energy Aware Sink Initiated Multi-path Routing Protocol*)

EASIMP [1] est un protocole multi-chemins dédié aux applications orientées requêtes, il permet d'augmenter la durée de vie du réseau en équilibrant la charge d'expédition de messages entre les nœuds, évitant ainsi l'arrêt prématuré de tout le réseau causé par la disparition d'un capteur sur-utilisé. Il permet, aussi, d'optimiser l'utilisation des autres ressources (*processeur*) des capteurs. Il satisfait l'une de métriques de la qualité de service, qui est le délai de transmission en choisissant la route la plus rapide.

Le protocole EASIMP agit en deux étapes pour établir des routes entre les nœuds capteurs et la station de base :

- Dans la première phase, la station de base collecte les informations nécessaires sur les capteurs afin de déterminer la topologie du réseau (les différentes routes) et de calculer le coût énergétique de chaque route.

- Dans la dernière phase, les capteurs sources répondent à la requête de la station de base en envoyant des données qui utiliseront la route inverse par où est passée la requête.

- **Avantages**

- EASIMP assure un équilibrage de charge ce qui aide à augmenter la durée de vie du réseau.

- **Inconvénients**

- Il ne satisfait qu'une seule métrique de qualité de service qui est le délai de transmission.

3. Protocole EPSR (*Efficient Path Setup and Recovery Protocol*)

EPSR[27] est un protocole de routage multi-chemins dédié aux réseaux de capteurs sans fil, il permet d'établir un chemin efficace en consommation d'énergie.

Ce protocole suit trois phases afin d'établir des routes entre les nœuds sources et la station de base pour le traitement des données échangés.

- Dans la première phase (*étape de configuration de la table de routage*) : Chaque nœud envoie ses propres informations d'état à d'autres nœuds pour trouver les voisins. Grâce à ce processus, chaque nœud capteur définit des informations d'état propre et accepte des informations provenant de nœuds voisins et établit une table de routage.
- Dans la deuxième phase (*Configuration de chemin*) : Envoie d'un message de demande à ses voisins, pour demander des données et établir un chemin de données.
- Dans la dernière phase (*étape de récupération du chemin*) : Si un nœud veut modifier le chemin de données, il envoie le message de changement de chemin vers le nœud qui va recevoir ces données. D'où un nouveau chemin de données sera établi.

- **Avantages**

- EPSR est robuste lors de l'échec d'un chemin de données.

- **Inconvénients**

- Ce protocole consomme beaucoup d'énergie pour transmettre un message d'une source à une destination.

4. Protocole EBMR (*Energy-Balancing Multi-path Routing Protocol*)

EBMR[28] est un protocole de routage multi-chemins où la station de base est responsable de trouver les chemins multi-path à la source et choisit un pour utiliser pendant la communication. En outre, la station de base met à jour de façon dynamique l'énergie disponible de chaque nœud le long du chemin en fonction de la quantité des paquets envoyés et reçus. EBMR agit en deux phases :

- Phase 1 (*Construction de topologie*) : Pour lancer la construction de la topologie, la station de base d'abord diffuse un paquet ND (*Neighbors Discovery*) vers l'ensemble de réseau. A la réception de ce paquet, chaque nœud enregistre l'adresse du dernier nœud à partir duquel il reçoit le paquet et il le transmet à ses voisins. Après la fin de ND, la station de base diffuse un autre paquet NC (*Neighbors Collection*) pour collecter l'information de chaque nœud voisin. Lorsque le nœud du capteur reçoit le paquet NC, il répond par le paquet NCR (*Neighbors Collection Répondre*) par inondation. Ensuite, la station de base a une vision sur la topologie du réseau à travers les informations de tous les nœuds voisins.
- Phase 2 (*Transmission de données*) : Dans cette étape, la station de base diffuse une requête pour la détection de données avec des fonctionnalités spécifiques. Ensuite, les nœuds de capteurs satisfont la requête répondent à la station de base. Cette dernière calcule le chemin le plus court vers le nœud source qui a le maximum d'énergie disponible sur chaque nœud capteur et cela augmente la durée de vie du réseau.

- **Avantages**

- Ce protocole est très fiable en termes de consommation d'énergie ce qui augmente la durée de vie d'un RCSF.

- **Inconvénients**

- EBMR a une surcharge de paquets élevée lors de la construction des chemins.

5. Protocole EANDMRP (*Energy Aware Node Disjoint Multi-path Routing Protocol*)

EANDMRP [29] est un protocole de routage multi-chemins, ce protocole utilise la file d'attente prioritaire en fonction du nombre de saut des nœuds pour trouver plusieurs chemins à nœuds disjoints.

EANDMRP suit les deux phases suivantes :

- La première phase consiste à définir la topologie de réseau. la station de base diffuse un paquet BNTR (*Build Network Topology Request*) sur l'ensemble du réseau pour générer une table de routage. Le nœud recevant ce paquet met à jour la liste de ses nœuds voisins selon les informations de l'expéditeur du BNTR.
- Dans la deuxième phase, lorsque la station de base a un message à envoyer à la destination, elle calcule l'itinéraire entier vers le destination, puis envoie le paquet de données contenant la route calculée a la destination.

En effet, ce protocole peut réduire le surcharge de message de routage et empêche d'avoir une boucle puisque le nœud intermédiaire ne calcule pas la route sur l'envoi du paquet.

- **Avantages**

- Ce protocole réduit le surcharge de message de routage.

- **Inconvénients**

- Ce protocole dispose d'un long délai de transmission.

3.4 Tableau comparatif et discussion

Le tableau 3.1 nous donne une idée globale sur la différence entre tous les protocoles étudiés dans ce chapitre.

Protocole	Classe	Paramètres de QoS	Energie
MMRE-AOMDV [25]	Métrique simple	Non	Oui
ILR [5]	Multi-métrique	Délai	Oui
MMSPEED [7]	Positionnement global	Délai	Oui
EASIMP [1]	Communication gérée par la station de base	Délai et durée de vie	Oui
MPSR [11]	Communication gérée par la station de base	Durée de vie	Oui
EPSR [27]	Communication gérée par la station de base	Fiabilité	Oui
EBMR [28]	Communication gérée par la station de base	Délai et durée de vie	Oui
EANDMRP [29]	Communication gérée par la station de base	Durée de vie	Oui

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

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 qu'il y a des protocoles qui ne tiennent pas en compte les exigences de fiabilité et tolérance au panne pour un RCSF, tel que la minimisation de la consommation d'énergie, l'allongement de la durée de vie du réseau, 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 et de tolérance aux défaillances. D'autres protocoles peuvent exiger des informations de positionnement global précises. Ainsi la plupart de ces protocoles ne considèrent pas les limitations des nœuds

capteurs, l'énergie et la taille de la memoire. Par contre les protocoles de la dernière classe sont meilleurs car ils augmentent la durée de vie de leurs réseaux en assurant un bon équilibrage de charge.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une petite définition de routage multi-chemins dans les RCSFs, ainsi que ses objectifs, on cite : la fiabilité, l'équilibrage de charge, etc.

Les chemins découverts par un protocole de routage multi-chemins doivent être disjoints si on veut qu'ils bénéficient d'une certaine indépendance vis-à-vis des pannes. Cette disjoint peut être totale ou partielle. Nous avons dégagé trois approches de disjonctions : chemins à nœuds disjoints, chemins à liens disjoints et chemins non disjoints.

Puis nous avons vu les principales classifications des protocoles de routage multi-chemins dans la littérature qui sont : routage basé sur une métrique simple, routage multi-métriques et routage basé sur le positionnement global ainsi que proposé une quatrième classe qui est communication gérée par la station de base et sur cette classe que se base notre travail.

Enfin nous avons construit un tableau comparatif de tous les protocoles de routage étudiés.

Dans le chapitre qui suit, on s'intéresse à l'implémentation ainsi que la simulation de protocoles EASIMP, EBMR et EPSR de la nouvelle classe proposée pour pouvoir évalué leurs performances tel que le délai de bout en bout, la durée de vie, etc.

Evaluation des performances des protocoles EASIMP, EBMR et EPSR

4.1 Introduction

Le concept du routage multi-chemins consiste à choisir un seul chemin parmi plusieurs constituant le réseau pour acheminer ces données vers une certaine destination. Ce mécanisme se base sur l'approche de sélection des routes, pour cela nous avons étudié précédemment la classification de ces protocoles de routage. En effet, nous nous sommes basé sur la quatrième classe qui constitue le cœur de notre travail.

Dans cette classe, la station de base est chargée de déterminer tous les chemins existants et choisir la route la plus optimale en terme de coût énergétique. Nous avons étudié quelques protocoles de cette classe ainsi sélectionné les trois protocoles suivants : EASIMP, EBMR et EPSR à implémenter. Ce choix est justifié par le fait que la principale caractéristique de ces protocoles réside dans l'acheminement des données capturées en assurant l'équilibrage de l'énergie consommée par chaque nœud afin de maximiser la durée de vie du réseau.

L'aide principale de ces protocoles est de découvrir plusieurs chemins entre un nœud source et un nœud destination dans le réseau et choisir la route la plus optimale en consommation d'énergie.

4.2 Implémentation

Pour mieux comprendre le fonctionnement des protocoles EASIMP, EBMR et EPSR. Les organigrammes suivants nous donne une idée générale sur les principales étapes de l'implémentation de ces protocoles.

— L'organigramme de protocole EASIMP

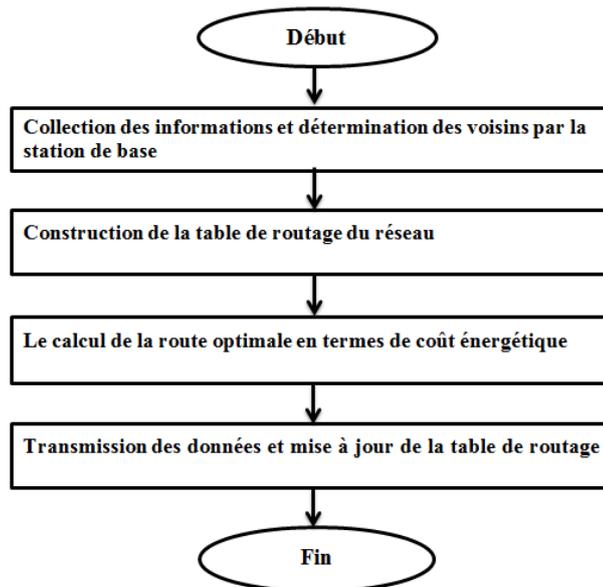


FIGURE 4.1 – Organigramme utilisé pour implémenter EASIMP.

— L'organigramme de protocole EPSR

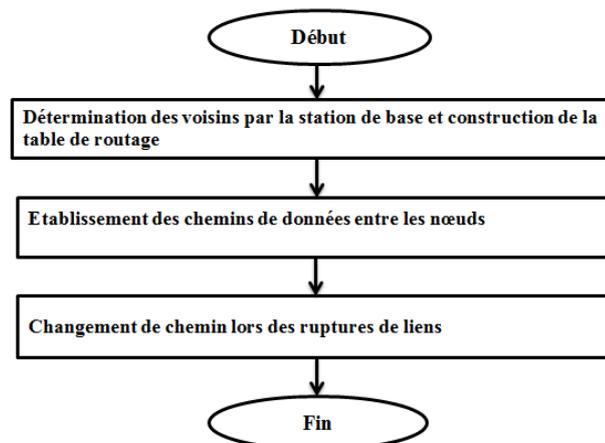


FIGURE 4.2 – Organigramme utilisé pour implémenter EPSR.

— L'organigramme de protocole EBMR

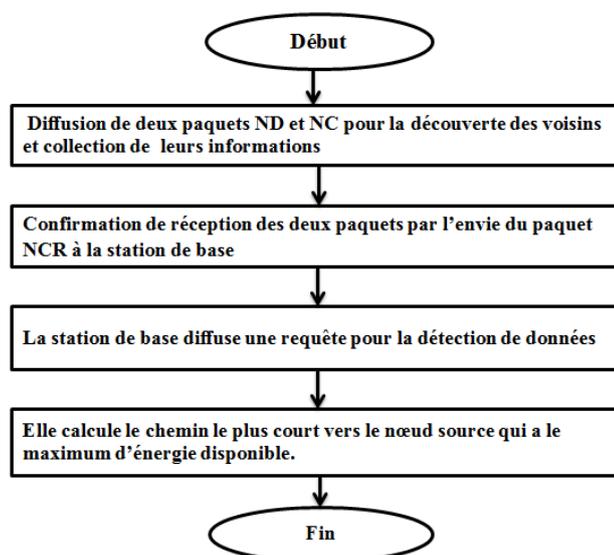


FIGURE 4.3 – Organigramme utilisé pour implémenter EBMR.

4.3 Environnements de simulation

La simulation est la méthode d'évaluation de performances la plus prédominante dans le domaine des réseaux de capteurs. Elle est largement utilisée pour évaluer les nouvelles architectures et les protocoles de communication, car elle permet de tester à moindre coût ces nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui pourront surgir durant leurs implémentations réelle. Pour le faire, elle construit un modèle du système réel en représentant toutes ses entités, leur comportement et leur interaction pour mener en suite des expériences sur ce modèle avec une simple modification des paramètres de simulation dont les résultats seront facilement analysables et interprétables.

Les simulateurs les plus utilisés sont NS-2, OMNET+ +, et J-Sim.

- **Network Simulator (NS-2) :**

C'est un simulateur à événements discrets [26] développé à *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL). Il s'agit d'une extension de NS conçue pour les réseaux sans fil. Son langage de base est le C++. L'outil *Network Animator* (NAM) associé au simulateur NS permet de

visualiser des animations de la simulation (transfert de paquets d'un nœud à un autre, taille des paquets, remplissage des files d'attentes, etc).

- **Objective Modular NETWORK Test-bed in C++ (OMNET++) :**

C'est un outil de simulation permettant de tester des simulations d'évènements discrètes. Cet outil peut être utilisé dans les cas suivants :

- Simulation des protocoles des réseaux informatiques y compris les réseaux sans fil.
- Simulation des architectures multiprocesseurs.
- Evaluation des systèmes complexes.
- Simulation du parallélisme dans quelques systèmes.

Omnet++ permet de créer l'interface de la simulation et d'écrire le code par le biais du langage C++. Omnet++ a été développé après l'apparition de quelques outils notamment NS2 et OPNET. Il comprend plusieurs processus basés sur des machines à états finis. Ces dernières sont aptes à communiquer entre elles. A la différence d'OPNET, Omnet++ est un outil académique gratuit. Il est basé sur la programmation modulaire qui offre une grande flexibilité.

- **Java-Simulator (J-Sim) :**

Est un simulateur open source calqué sur NS2 et fonctionnant avec la plat forme JAVA [24], développé par *Ohion State University*. Ce simulateur utilise deux langages différents Java et Jacl. Le langage Java sert à implémenter les différentes classe des packages J-Sim. Alors que le langage Jacl (TCL pour Java) est utilisé pour la mise en place des scénarios de simulation.

4.3.1 Choix de l'environnement de simulation

Nous aurions aimé simuler les trois protocoles sélectionnés avec un simulateur dédié aux réseaux de capteurs en particulier NS2. Comme nous n'avons pas pu cerner ce simulateur à cause de différents obstacles rencontrés,

alors nous nous sommes tournés vers le langage de programmation Java. La programmation typiquement fonctionnelle et orientée objet offerte par ce langage nous a épaulé pour réaliser notre propre simulateur qui sera une plateforme pour la simulation des trois protocoles.

Java a été lancée par *Sun Microsystems* dans le but d'augmenter la productivité des programmeurs. Ces caractéristiques principales sont :

- Java est extensible à l'infini sans aucune limitation. Pour étendre le langage, il suffit de développer de nouvelles classes.
- Java est un langage compilé c'est-à-dire qu'avant d'être exécuté, il doit être traduit dans le langage de la machine sur laquelle il doit fonctionner.
- Java est un langage simple à apprendre, la simplicité de Java est en fait directement liée à la simplicité du problème à résoudre.

4.4 Métriques de performances

Afin de mesurer l'efficacité énergétique de trois protocoles : EASIMP, EBMR et EPSR, nous nous sommes focaliser sur les métriques d'évaluation de performances suivantes :

- **Energie Moyenne Consommée (EMC) :**

L'un des principaux critères de performance pour un réseau de capteur sans fil est l'énergie moyenne consommée par tous les nœuds participants au transfert des paquets à partir d'un nœud source jusqu'au nœud destination qui sera calculer comme suit :

$$EMC = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{n}.$$

Où :

E_i : représente l'énergie consommé par le nœud i .

n : représente le nombre de nœuds dans le réseau.

- **Délai Moyen de Bout en Bout (DMBB) :**

Le délai de bout en bout (DBB) est exprimé par la moyenne des différences entre le temps de réception d'un paquet de donnée au niveau du nœud destinataire et le temps de son émission par le nœud source, pour tous les paquets de données bien reçus dans le réseau.

$$DMBB = \sum_{i=1}^n \frac{\text{temps de réception du paquet}(i) - \text{temps de émission du paquet}(i)}{\text{Nombre total de paquets reçus}}$$

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

Le taux de livraison de paquets (TLP) est le rapport entre le nombre de paquets délivrés avec succès à la station de base à celui émis par les nœuds sources. Cette métrique nous permet d'avoir une idée sur les performances du protocole en termes de routage et son degré de succès pour fournir les paquets de données captées à la station de base. Mathématiquement TLP est donné par [24] :

$$TLP = \frac{\text{Le nombre de paquets reçus par la station de base}}{\text{Le nombre de paquets émis par les nœuds sources}}$$

- **Durée de Vie du Réseau (DVR) :**

La durée de vie du réseau est comme étant la durée d'épuisement des nœuds capteurs par unité de temps jusqu'à la mort du premier nœud, en raison de l'épuisement de la batterie.

4.5 Le modèle énergétique

Le modèle radio proposé par Heinzelman [14] a été utilisé pour calculer l'énergie consommée pendant l'émission et la réception des messages. Selon ce modèle, l'énergie consommée pendant la transmission est donnée par :

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

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 joule.
- L'exécution de la simulation a été effectuée pendant une période de 300 secondes.
- Tous les nœuds possèdent la même portée de communication R , égale à 50 mètre.
- Les valeurs de E_{elec} et E_{amp} sont respectivement 100 pJ/bit, 50 nJ/bit.

4.6 Paramètres de simulation

Les principaux paramètres de simulation des trois protocoles sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Valeurs
Nombre de nœuds	20 à 160
Taille de la surface	100m * 100m
Déploiement des nœuds	Aléatoire
Energie initiale	3J
E_{elec}	100 pJ/bit
E_{amp}	50nJ/bit
Nombre de station de base	1
Taille de paquet	256 bit
Temps de simulation	300 s

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

4.7 Discussion des resultats

Dans ce qui suit, nous discutons les résultats de simulations obtenus suivant les métriques de performances citées précédemment.

— Délai moyen de bout en bout :

La figure 4.1 représente le délai moyen de bout en bout des protocoles comparés. Le délai moyen pour tous les protocoles testés augmente avec l'augmentation de la taille de réseau

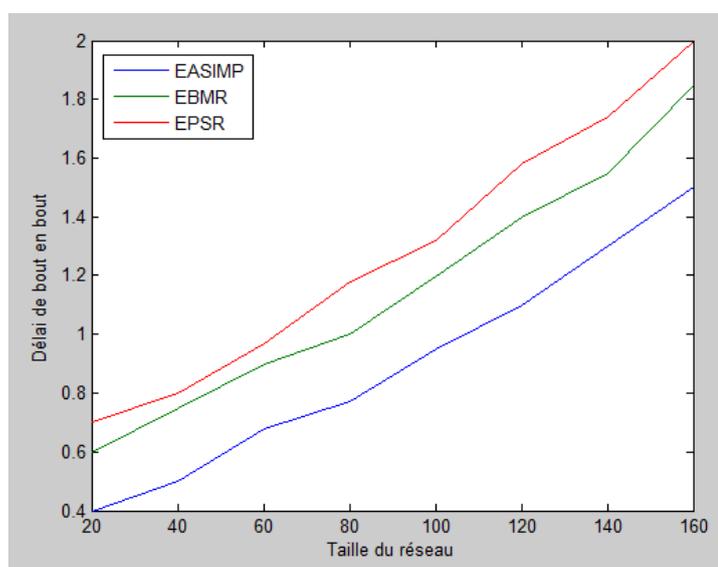


FIGURE 4.4 – Délai moyen de bout en bout vs nombre de nœud.

Lorsque le nombre de nœud est très petit, les trois protocoles ont un délai très proche. Une fois que la taille du réseau augmente, le protocole EASIMP produit une meilleur performance. La raison est que ce protocole favorise les nœuds ayant un niveau d'énergie élevé lors de l'acheminement des paquets des données et empêche les nœuds critiques en énergie de participer à la transmission des données. Ce qui produit moins de rupture de liens (échec des chemins) et réduit considérablement le délai de bout en bout.

— Moyenne d'énergie consommée :

La figure ci-dessous illustre la consommation énergétique moyenne des 160 nœuds capteurs pris en compte pour la simulation des trois protocoles EASIMP, EBMR et EPSR.

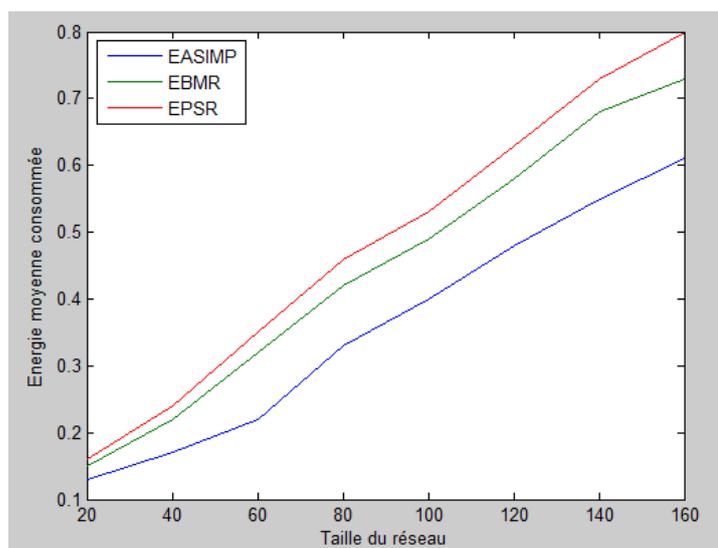


FIGURE 4.5 – Energie moyenne consommée vs nombre de nœud (Joules).

L'énergie moyenne consommée est obtenue en évaluant l'énergie résiduelle au niveau de chaque nœud. La figure 4.2, nous montre l'évolution de cette énergie suivant la taille de réseau.

Au début, cette énergie est presque la même pour les trois protocoles, donc l'énergie totale de l'envoi et de reception n'est pas importante dans le cas ou la nombre de nœud est très petit, l'énergie moyenne consommée diffère d'un protocole à un autre.

En effet, on constate un déséquilibre de la consommation d'énergie une fois que la taille de réseau augmente, nous remarquons que le protocole EASIMP consomme moins d'énergie que EBMR et EPSR. En premier lieu, EASIMP est en mesure d'éviter les nœuds qui sont faibles en énergie pour la construction des chemins multiples. Cela signifie que les chemins à énergie plus élevé sont identifiés et sélectionnés pour la transmission des chemins de données. En second lieu, EASIMP est en mesure d'équilibrer l'énergie entre les différents chemins ce qui réduit la consommation énergétique.

— Durée de vie du réseau :

La figure 4.3 nous montre la durée de vie de réseau en fonction de nombre de nœud.

Les resultats montrés dans cette figure confirme les resultats présentés dans la figure 4.2, il est claire que le protocole EASIMP a une durée de

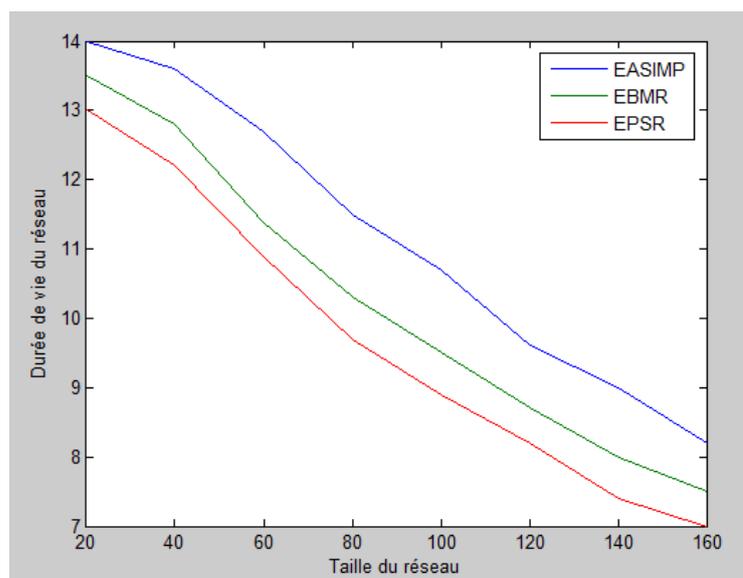


FIGURE 4.6 – Durée de vie de réseau vs nombre de nœud (seconds).

vie de réseau meilleur par rapport aux les deux autre protocoles, parce que, ce dernier consomme le minimum d'énergie pour la transmission de ces données.

— **Taux de livraison :**

La figure 4.4 nous montre les taux de livraison des trois protocoles de routage EBMR, EASIMP et EPSR.

Nous remarquons clairement que le protocole EASIMP a un taux élevé par rapport aux deux autre protocoles. En effet, cette performance en terme d'acheminement des paquets vers la station de base est très réussie, et cela dû au fait que ce protocole respecte le délai de bout en bout exigé par les paquets en choisissant le plus court chemin.

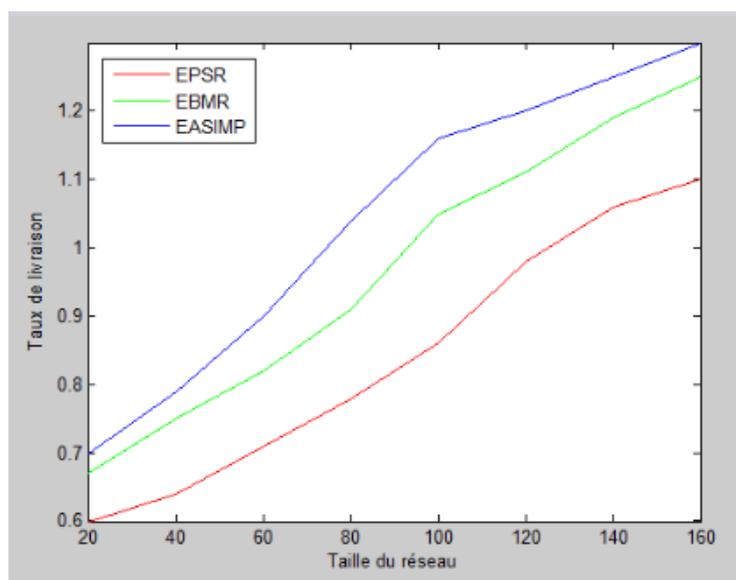


FIGURE 4.7 – Taux de livraison vs nombre de nœud.

4.8 Conclusion

Plusieurs protocoles sont développés pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs, chacun d'eux est adapté à un type d'application. Dans ce chapitre nous avons illustré les différents résultats obtenus après avoir implémenté les protocoles de routage multi-chemins EBMR, EASIMP et EPSR sous Java.

nous avons fait une analyse comparative des performances de ces trois protocoles afin de faire face aux changements de topologie et assurer une meilleur QoS dans le réseau.

A travers les différents résultats, nous avons pu déduire que le protocole EASIMP fournit plus de fiabilité avec un équilibrage de la charge sur tous les nœuds du réseau par rapport aux protocoles EBMR et EPSR. Par conséquent, il permet de minimiser l'énergie consommée par le réseau.

Conclusion générale et perspectives

Le travail consigné dans ce mémoire a été le fruit d'une étude menée dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, ce qui nous a permis de découvrir les propriétés de ces derniers, de leurs contraintes et des domaines variés qui les utilisent. Nous nous sommes intéressées principalement au routage des données dans les réseaux de capteurs pour améliorer certains critères de performances tel que la consommation d'énergie, le délai de transmission, etc.

Dans ce mémoire nous nous sommes focalisés au concept de routage multi-chemins dans les réseaux de capteurs sans fil. Pour cela, nous avons fait une étude des principales classifications de routage multi-chemins dans la littérature. A savoir, routage basé sur une métrique simple, routage multi-métrique, routage basé sur le positionnement global et comme nouvelle classe routage basé sur une communication gérée par la station de base.

Cette dernière classe est considérée le noyau de notre travail, ou nous avons donné une taxonomie des différents protocoles de routage de cette dernière classe. En effet, nous avons fait une étude détaillée des protocoles de routage qui constitue cette classe. Après, nous avons évalués les performances des trois protocoles de routage multi-chemins choisis, appelés : EASIMP, EBMR et EPSR. Les résultats de simulation ont montrés que le protocole EASIMP est le meilleur, car il permet d'équilibrer la consommation d'énergie de tous les nœuds, par conséquent, augmente la durée de vie du réseau. Cela est montré dans le dernier chapitre, lors de la comparaison des protocoles simulés.

Perspectives

Comme perspective de notre travail, nous espérons que nous pourrions dans le futur proche de simuler les trois protocoles avec un simulateur dédié aux réseaux de capteurs en particulier NS2.

Une autre perspective est de proposer un nouveau protocole de la quatrième classe qui sera plus performant en consommation énergétiques que les protocoles simuler.

Bibliographie

- [1] S.Boulfekhar. «*Optimisation de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*». Thèse de doctorat, Université A.Mira Béjaïa, 2013.
- [2] V.Gayraud, L.Nuaymi, F.Dupont, S.Gombault, B.Tharon. «*La securite dans les reseaux sans fil ad hoc*». École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne (ENSTB), 2003.
- [3] N.Bendimirad. «*DYMO Multi-chemins à nœuds disjoints sans interférences pour les réseaux ZigBee/standard IEEE 802.15.4*», Mémoire de Magistère, Université d'Oran, 2000.
- [4] M. Badet, W. Bonneau. «*Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation*». Mémoire de Master, Université Pau, 2006.
- [5] A.Tiab. «*Routage dans les réseaux capteurs sans fils en envirenement industriel : économie d'énergie et qualité de service*». Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2017.
- [6] M.Belbachir. «*Stratégie de tolérance aux pannes pour un routage efficace dans les réseaux de capteurs*». Mémoire Magister, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2014 .
- [7] C.Castelluccia et E.Francillon. «*Protéger les réseaux de capteurs sans fil*». Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), 2008.
- [8] F. Akyildiz, Weilian Su, Sankarasubramaniam, E. Cayirci. «*A survey on sensor networks*». IEEE Communications, 2002.
- [9] Y.Xue, A.Gonzalez, A.Aguillar, M.Baroux. «*Agrégation de donnée dans les réseaux de capteur*». Rapport de recherche SR04, Université de Technologie Compiègne, 2010.

-
- [10] M. Lehsaini. «*Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique*». Thèse de Doctorat, Université A,B Tlemsan, 2009.
- [11] M. Achir and L. Ouvry. «*A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-Path Source Routing Protocol (MPSR)*». IEEE Personal Communications, 2000.
- [12] L. Khelladi, N. Badache, «*Les réseaux de capteurs : Etas de l'art*». Rapport de recherche, USTHB, Alger, 2004.
- [13] N. Mitton. «*Auto-organisation dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle*». Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 2006.
- [14] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. «*Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks*». Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [15] B. Sahraoui. «*Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil*». Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, 2013.
- [16] K. Akkaya, M. Younis. «*A survey on routing protocols for wireless sensor networks*». Rapport de recherche, University of Maryland. Baltimore Country, 2005.
- [17] E. Dhib. «*Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs*». Projet fin d'étude ingénierie de réseaux, Ecole Supérieure des Communications de Tunis, 2007.
- [18] .N. Al-Karaki et A.E. Kamal. «*Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : a Survey*». IEEE Wireless Communications, 2004.
- [19] M. Patil, Rajashekhar C. Biradar. «*A Survey on Routing Protocols in Wireless Sensor Networks*». IEEE Communications, India, 2012.
- [20] S. Ehsan , B. Hamdaoui. «*A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks*». IEEE Communications 2012.
- [21] R. Sheibani, E. Sharififar, M. Khosronejad, M. Reza Mazaheri, B. Homayounfar. «*A Reliable and QoS Aware Multi-path Routing Algorithm in WSNs*». Third International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies, 2012.

- [22] K.Sohrabi, J.Gao, V.Ailawadhi, and G-J.Pottie. « *A Protocols for self-organization of a wireless sensor network*». IEEE Personal Communications, 2000.
- [23] A.Nasipuri , R.Castaneda, S.R.Das. « *Performance of multi-path routing for On-demand protocols in mobile ad hoc networks*». IEEE Personal Communications, 2001.
- [24] M. Khelifi. « *Optimisation de la consommation de l'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil*». Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2008.
- [25] Y.Liu, L.Guo, H.Ma and T.Jiang. « *Energy Efficient on-demand Multipath Routing Protocol for Multi-hop Ad Hoc Networks*». IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2008.
- [26] C.Barakat. « *Le simulateur de réseau NS, manuel d'utilisation*». Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA).
- [27] J.N. Al-karaki, A.E. Kamal. « *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks A Survey*». IEEE Wireless Communications, 2004.
- [28] V.Ponduru, D.Ghosal, and B.Mukherjee. « *A Distributed Coverage-Preserving Multi-path Routing Protocol in Wireless Sensor Networks*». Professor of Computer Science, University of California at Davis, 2004.
- [29] K.Guan 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.