

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 de Recherche Opérationnelle



MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision

Spécialité : Modélisation et Evaluation des Performances Réseaux

Thème

Evaluation des performances d'un nouveau protocole de routage avec QoS dans les RCSFs

Présenté par :

Melle.ASSAM Katia

Devant le jury composé de :

Mr B.BRAHMI MCA	Président
Mme M.GHARBI MCA	Examinatrice
Mme F.BELAMRI Doctorante	Examinatrice
Mme BOULFEKHAR.S MCA	Promotrice

Remerciements

Merci à **Dieu** de m'avoir donné la force et le courage de mener à bout ce travail.

Je ne remercierais jamais assez **mes parents**. Dieu qu'ils les garde, pour tout ce qu'ils m'ont fait pour pouvoir travailler dans les meilleures conditions possibles, ainsi que tous les membres de **ma famille**.

Je remercie vivement Mme **BOULFEKHAR** pour sa disponibilité, son soutien, ses précieux conseils et sa sympathie, qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent aux membres du jury **Mr BRAHMI.B**, **Mme GHARBI.M** et **mme BELAMRI.F** qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce modeste travail.

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous mes amis et collègues pour leurs aide et soutien.

Je ne manque pas de remercier tous mes enseignants qui ont concouru à ma formation, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie cet événement marquant de ma vie à mes chères parents.

À mon aimable frère.

À ma chère famille.

À tous ceux que j'aime et que je respecte.

Katia

TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	1
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Notations	1
Introduction Générale	3
1 Les réseaux de capteurs	6
1.1 Réseaux sans fil	6
1.2 Capteurs	7
1.2.1 Définition d'un capteur	7
1.2.2 Architecture d'un capteur	8
1.3 Réseau de Capteurs Sans Fil	10
1.3.1 Définition d'un RCSF	10
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs	10
1.4 Domaine d'application	11
1.4.1 Applications militaires	11
1.4.2 Surveillance de l'environnement et l'agriculture	12
1.4.3 Surveillance des Habitats	13
1.4.4 Industrie	13

1.4.5	Santé	14
1.4.6	Maison, bureau, et vie civile	15
1.5	Plates-formes	17
1.5.1	Bluetooth	17
1.5.2	ZigBee	17
1.5.3	Ultra wideband	17
1.6	Modèle en couches	18
1.6.1	Couche physique	18
1.6.2	Couche liaison	18
1.6.3	Couche réseau	19
1.6.4	Couche transport	19
1.6.5	Couche application	19
1.6.6	Plans de gestion	20
1.7	Caractéristiques des réseaux de capteurs	20
1.7.1	Durée de vie limitée	20
1.7.2	Ressources limitées	21
1.7.3	Scalabilité	21
1.7.4	Topologie dynamique	21
1.7.5	Agrégation des données	21
1.8	Facteurs de conception des réseaux de capteurs	22
1.8.1	Tolérance aux pannes	22
1.8.2	Scalabilité	22
1.8.3	Coûts de production	22
1.8.4	Contraintes matérielles	23
1.8.5	Support de transmission	23
1.8.6	Topologie du réseau	23
1.8.7	Consommation d'énergie	24
1.9	Type de communication dans les RCSFs	24
1.10	Conclusion	26

2	Routage avec QoS dans les réseaux de capteurs sans fil	27
2.1	Introduction	27
2.1.1	Définition du routage	27
2.1.2	Objectif du routage	28
2.2	Considérations de conception d'un protocole de routage dans les RCSFs . .	28
2.3	Qualité de service	29
2.3.1	Définition de la Qualité de service	29
2.3.2	Métriques de QoS	29
2.4	Quelques protocoles de routage avec QoS dans les RCSFs	31
2.5	Comparaison des différents protocoles avec QoS	41
2.6	Conclusion	43
3	Notre protocole de routage EERP-QoS	44
3.1	Description de EERP	44
3.2	EERP Amélioré (EERP-QoS)	50
3.2.1	Objectifs de EERP-QoS	50
3.3	Modélisation de EERP-QoS avec les Réseaux de Pétri	53
3.3.1	Réseaux de Pétri	54
3.4	Conclusion	58
	Conclusion et Perspectives	59

TABLE DES FIGURES

1.1	types de capteurs	7
1.2	Architecture physique d'un capteur	8
1.3	Architecture d'un RCSF	11
1.4	applications militaires	12
1.5	Surveillance d'animaux	13
1.6	Surveillance médicale	15
1.7	Déploiement des capteurs dans l'environnement	16
1.8	Application des capteurs dans les différents domaines	16
1.9	Modèle de couches des capteurs	18
1.10	types de communication	25
3.1	Phase de connaissance	46
3.2	Phase de transmission	48
3.3	phase de maintenance	49
3.4	EERP-QoS avec RdP	56
3.5	Rapport 1	57
3.6	Rapport 2	57

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Comparaison entre les différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs. 42

- **BAN** : Body Area Network.
- **BFEQM** : Balanced and Flexible Energy Efficient and QoS based Multipath routing.
- **CH** : Cluster Head.
- **CPN Tools** : Coloured Petri Nets.
- **DCEMRA** : Delay Constrained Energy-efficient Multi-hop Routing Algorithm.
- **DSR** : Dynamic Source Routing.
- **E3MSPEED** :Enhanced Mac MMSPEED.
- **EERP** : Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks.
- **EERP-QoS** : Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks with Quality of Service.
- **EQSR** :Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks.
- **FIFO** : First In, First Out.
- **GPS** : Global Positioning System.
- **MAC** : Medium Access Control.
- **MATLAB** : Matrix LABoratory.
- **MCMP** : Multi Constrained QoS Multi-Path routing.
- **MMSPEED** : Multipath Multi SPEED.
- **NEIDET** : NEIghbourhoods DETection.

- **OQoS-CMRP** : Optimized QoS-based Clustering with Multipath Routing Protocol.
- **OSI** : Open Systems Interconnect.
- **PC** : Personal Computer.
- **PDORP** : PEGASIS-DSR Optimized Routing Protocol.
- **PEGASIS** : Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems.
- **QDAR** : Q-Learning-based Delay-Aware Routing algorithm to Extend the Lifetime of Underwater Sensor Networks.
- **QEMPAR** : QoS and Energy Aware Multi-Path Routing Algorithm for RealTime Applications in Wireless Sensor Networks.
- **QdS** : Qualité de Service.
- **QoS** : Quality of Service.
- **RCSF** : Réseau de Capteurs sans Fil.
- **RdP** : Réseau de Pétri.
- **SB** : Station de Base.
- **SPEED** : Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks.
- **WSN** : Wireless Sensor Network.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. L'environnement sans fil permet aux utilisateurs une souplesse d'accès et une facilité de manipulation des informations via divers unités de calcul mobiles. La recherche dans ce domaine est en pleine effervescence [14].

Durant cette dernière décennie, une architecture nouvelle a vu le jour : les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) qui se trouvent être un cas particulier des réseaux ad hoc. Ce type de réseaux résulte d'une fusion de deux pôles de l'informatique moderne les systèmes embarqués et les communications sans fil.

Les processus industriels, les applications militaires de tracking, le monitoring d'habitat, ainsi que l'agriculture de précision ne sont que quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications possibles du suivi continu offert par les RCSF, grâce à ce potentiel riche en applications [39].

Motivations et problématique

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) se distinguent par leur densité de nœuds importante, leur autonomie énergétique limitée, leur topologie mobile, etc. Ces contraintes ont posé plusieurs défis pour la conception et la gestion de ces réseaux et les principaux problèmes qu'on peut rencontrer sont la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité

imprévisible des nœuds, l'énergie consommée par le nœud, la qualité de service (QoS), etc. Ce dernier est un critère important à prendre en considération lors du processus d'acheminement des données. Parmi les métriques de la qualité de service on trouve la bande passante, le débit, le délai, la gigue et la fiabilité. C'est dans la perspective d'améliorer les trois dernières métriques que s'inscrivent les travaux effectués dans ce mémoire.

Contributions

Dans ce mémoire, notre contribution se concentre sur l'amélioration d'un protocole de routage EERP (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks) qui a prouvé son efficacité en consommation d'énergie et en fiabilité. Notre objectif se situe en l'intégration de certaines métriques de la qualité de service. Plus précisément la réduction de la congestion en prenant en considération la taille de la mémoire libre du buffer afin de ne pas la saturer, ainsi ne pas perdre des paquets et de réduire le délai. La gigue est également considérée en incorporant le paramètre SNR (signal noise ratio) qui est une mesure sur la qualité du lien en terme de bruit interférant la transmission. Nos actions effectives sont énumérées comme suit :

1. Une étude synthétique des travaux de recherche qui ont été faits dans le domaine des RCSFs, du routage et de la qualité de service.
2. Conception et mise au point de notre proposition qui consiste à intégrer des paramètres de qualité à la fonction coût déjà existante, pour le choix du prochain saut.
3. Modélisation et évaluation de notre solution en utilisant les réseaux de Pétrie et en l'implémentant sous CPN(colored Petri Net) tools.

Organisation du mémoire

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres. Le premier chapitre, est une partie introductive pour les réseaux de capteurs, leurs architectures, leurs principales caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que les contraintes de conception d'un tel type de réseau.

Dans le deuxième chapitre nous parlerons du routage, des considérations de conception d'un protocole de routage et nous étalerons un état de l'art sur les protocoles de routages avec QoS.

Le troisième chapitre quant à lui, est consacré à la contribution qui se trouve être EERP-QOS, la modélisation et l'évaluation avec les RdP.

On termine avec une conclusion et quelques perspectives.

CHAPITRE 1

LES RÉSEAUX DE CAPTEURS

Introduction

Comme beaucoup de développements technologiques, les réseaux de capteurs sans fil ont émergé pour des besoins militaires tels que la surveillance sur le terrain de combat. Puis, ils ont trouvé leur chemin pour des applications civiles. Aujourd’hui, ils sont devenus une technologie clé pour les différents types d’environnements intelligents. Ceci est dû essentiellement aux caractéristiques inhérentes à cette technologie, et qui la favorisent pour un large étendu d’applications dans plusieurs domaines [37] .

Dans ce chapitre, nous allons présenter un ensemble de généralités sur ces réseaux, leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs classifications ainsi que leurs domaines d’applications. Nous discuterons les principaux facteurs qui influencent la conception des réseaux de capteurs, comme nous énumérons les types de communication pour enfin terminer avec une conclusion.

1.1 Réseaux sans fil

Un réseau sans fil (Wireless network) est, comme son nom l’indique, un réseau dans lequel les terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Les terminaux du réseau se

déplacent librement, tandis que le système doit assurer toutes les fonctionnalités et tous les services d'un réseau classique. La communication sans fil permet une grande flexibilité d'emploi [37].

1.2 Capteurs

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif destiné à effectuer des tâches de télédétection. La télédétection est définie comme la mesure ou l'acquisition d'informations sur les propriétés d'un objet, un phénomène ou un matériel par l'intermédiaire d'un capteur qui peut ne pas avoir de contact avec l'objet étudié. Il convertit par la suite les paramètres ou les événements du monde physique en signaux qui peuvent être mesurés et analysés [43]. La Figure 1.1 montre quelques types de capteurs.

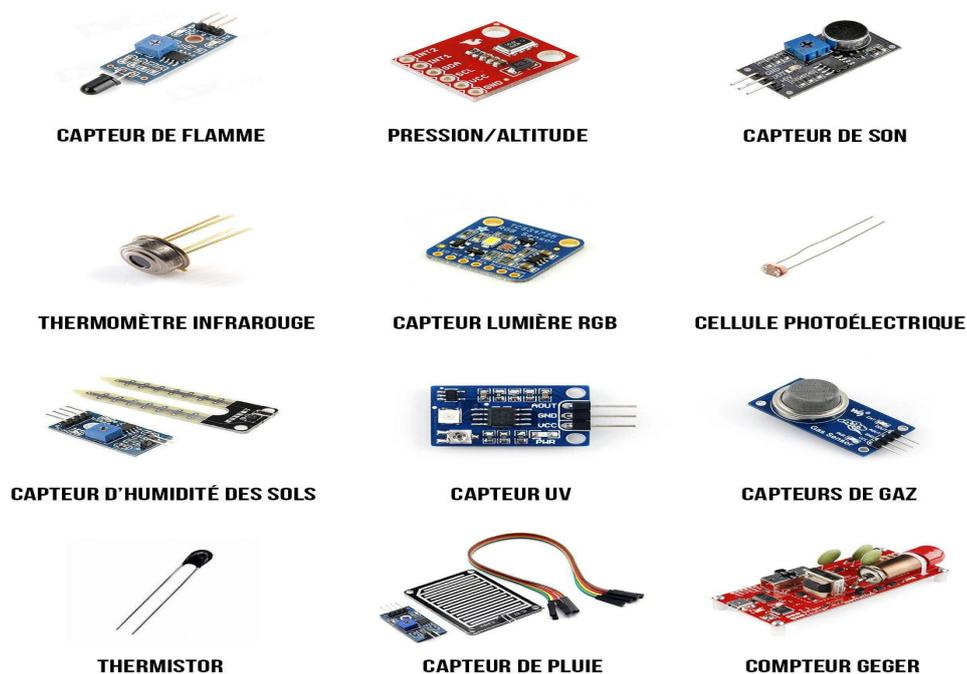


FIGURE 1.1 – types de capteurs

1.2.2 Architecture d'un capteur

• Architecture physique d'un capteur

Un capteur est composé de quatre éléments ou modules de base qui sont : l'unité de captage (Sensing Unit), l'unité de traitement (Processing Unit), l'unité de transmission (Transceiver Unit) et l'unité de contrôle d'énergie (Power Unit).

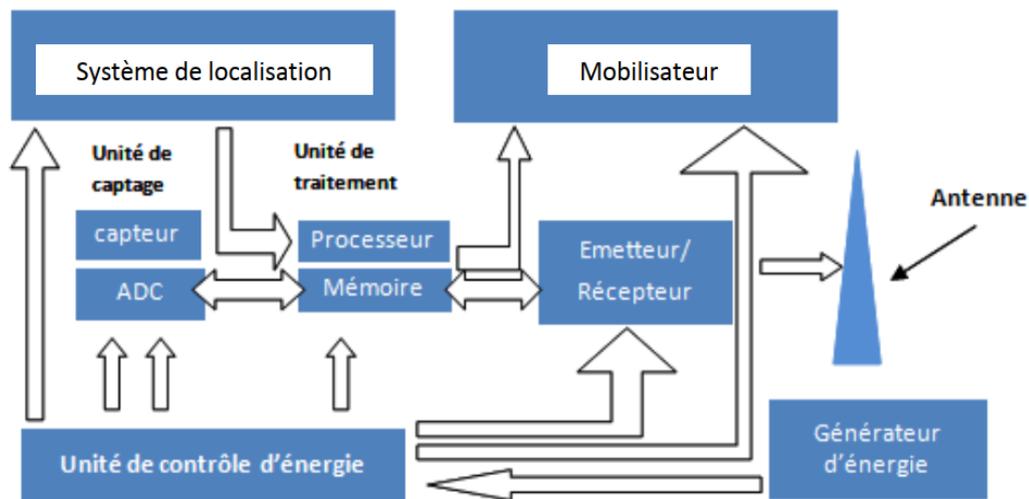


FIGURE 1.2 – Architecture physique d'un capteur

◇ Unité de captage

Elle est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [30].

◇ Unité de traitement

Composée d'un processeur et d'une mémoire intégrant un système d'exploitation spécifique (TinyOS, par exemple). Cette unité possède deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de communication. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication. Cette unité est également chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent de faire

collaborer le capteur avec d'autres capteurs. Elle peut aussi analyser les données captées [40].

◊ **Unité de transmission**

Composée d'antennes, elle est chargée d'effectuer toutes les émissions et les réceptions de données sur un support de transmission sans fil. L'unité de transmission, qui est un élément de base, peut-être de type optique. Les communications de ce type sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Ces communications peuvent être également de type radiofréquence [25].

◊ **Unité de contrôle d'énergie**

Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur. Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique, généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants. Cependant, cette ressource énergétique est limitée et dans la plupart des cas irremplaçable. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants, elle est responsable de répartir l'énergie sur les autres modules et de réduire les dépenses énergétiques (par la mise en veille des composants inutiles, par exemple). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires [42].

● **Architecture logicielle d'un capteur**

Pour que les capteurs puissent supporter différentes opérations, des techniques (open-source) se sont associées au succès avéré des RCSFs. Ces systèmes d'exploitation conçus spécifiquement pour ces réseaux utilisent une architecture basée sur les composants. Cela permet une implémentation et une innovation rapide et un code source de taille réduite. Plusieurs systèmes d'exploitation ont été développés pour répondre aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil. Parmi ces systèmes, nous citons TinyOS, MOS, SOS, etc [32].

1.3 Réseau de Capteurs Sans Fil

1.3.1 Définition d'un RCSF

Un réseau de capteurs peut être vu comme un réseau de microsystemes disséminés dans un espace donné et communiquant entre eux via une liaison sans fil. L'espace où agissent les capteurs s'appelle un champ de captage. Ce qui est intéressant dans les réseaux de capteurs, c'est que les nœuds sont souvent composés d'un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome.

Un réseau de capteurs sans fil est un type particulier de réseau Ad-hoc Mobile (MANET), où l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Chaque nœud possède la capacité de collecter des données et de les transmettre à une station de base [37].

1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs

L'utilisateur accède à distance aux données capturées à travers un nœud appelé le nœud directeur de tâche (Task Manager Node). Le nœud directeur de tâche est relié à l'Internet ou au satellite à travers un nœud destinataire appelé Puits (sink). Ce dernier agit en tant que passerelle pour le réseau de capteurs, c'est-à-dire qu'il relie des réseaux de capteurs à d'autres réseaux. Ce nœud est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requises aux capteurs via des messages de requêtes. Il a également d'autre capacité de traitement de l'information pour une transformation ultérieure s'il y a lieu. Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture appelée champ de capture. Les nœuds capteurs rassemblent les données et les conduisent au destinataire. De cette manière, les utilisateurs peuvent rechercher l'information dans les nœuds destinataires pour surveiller et commander l'environnement à distance. Notons qu'un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds Puits diffusant des intérêts différents. Par exemple, un nœud Puits peut demander à tous les capteurs se trouvant dans la région nord du champ de capture D'envoyer un rapport de température chaque 1 minute, pendant qu'un autre peut être intéressé Seulement par la

haute température ($> 40^{\circ}\text{C}$) dans la région sud. Par conséquent, un capteur doit pouvoir stocker toutes les requêtes reçues, et les traiter séparément [33].

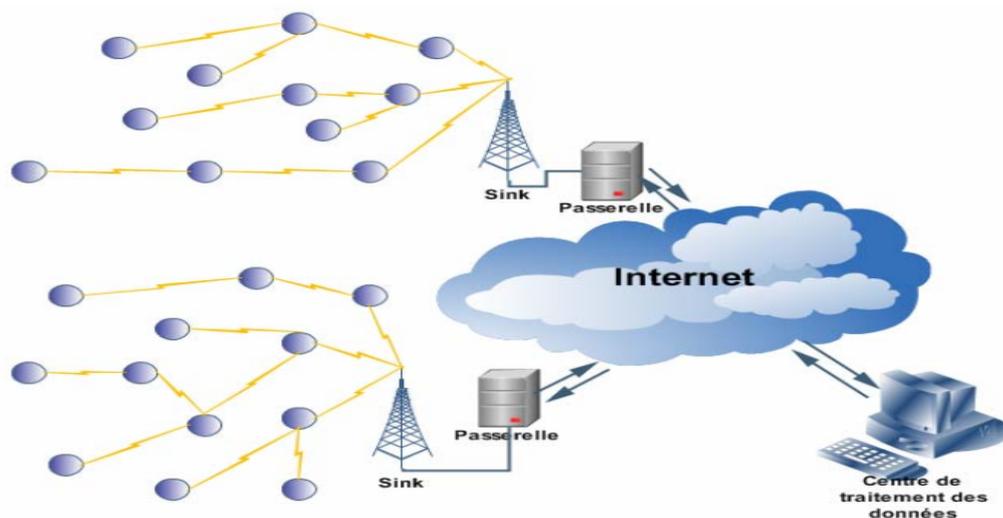


FIGURE 1.3 – Architecture d'un RCSF

1.4 Domaine d'application

1.4.1 Applications militaires

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été le point de départ du développement des réseaux de capteurs. Nous pouvons citer quelques exemples d'applications dans ce domaine [22].

- **Contrôle et gestion des forces**

Surveiller le statut et l'emplacement des troupes et des armements afin d'améliorer le contrôle, la communication et le commandement [22].

- **Surveillance et le contrôle des champs de bataille**

Un réseau de capteurs est déployé à partir d'un avion dans un champs d'intérêts, ensuite les capteurs vont se réorganiser afin d'exécuter les tâches prévues (analyser le terrain, détecter et poursuivre des objets ennemies, etc.) [22].

- **Protection**

Les objets sensibles par exemple : les stations nucléaires, les ponts, les canaux de gaz, les

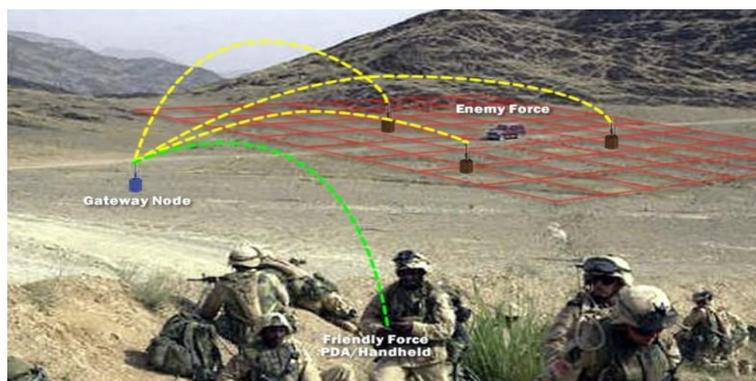


FIGURE 1.4 – applications militaires

stations de communications, les réserves d’armes, et les quartiers militaires, peuvent être protégé par un réseaux de capteurs intelligent capable de distinguer les différentes classes d’intrus [22].

1.4.2 Surveillance de l’environnement et l’agriculture

C’est le champ qui apporte le grand intérêt au réseau de capteurs. Plusieurs applications peuvent montrer l’utilité de ce genre de réseaux, parmi lesquelles on cite :

- **Précision d’agriculture**

Les informations collectées par un réseau de capteurs, dans un terrain, sur le climat et l’état de la terre, permettent un contrôle précis de l’utilisation de l’eau et des engrais [28].

- **Evolution des plantes**

Etudier l’évolution des différentes espèces de plantes dans les grandes forêts, ou dans les profondeurs sous marines, où la présence de l’homme est quasi impossible [28].

- **Exploration planétaire**

Exploration et surveillance dans les environnements hostiles, par exemple les volcans, les régions toxiques, etc [28].

- **Surveillance géophysique**

Les activités sismiques peuvent être détectées et étudiées à l’aide d’un réseau de capteurs implanté dans les régions sensibles [22].

- **Détection des désastres**

Par exemple les feux dans les forêts, les inondations de la neige, une pollution dans l’atmo-

sphère etc, peuvent être détectés et leurs causes peuvent être localisées par le déploiement d'un réseau de capteurs [22].

1.4.3 Surveillance des Habitats

L'utilisation des réseaux de capteurs dans ce champs de recherches a permet aux scientifiques d'étudier les comportements des animaux, oiseaux, ou poissons dans leurs milieux, où il était presque impossible avant de le faire [22].

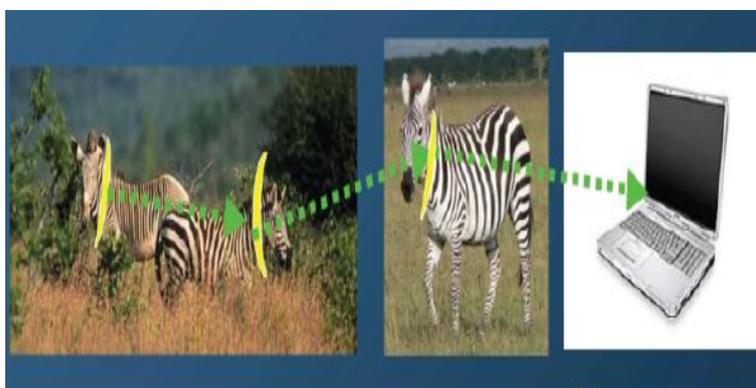


FIGURE 1.5 – Surveillance d'animaux

Ce genre de recherches a un grand intérêt pour l'humanité, parce qu'il permet de surveiller et protéger les différentes espèces menacées d'extinction. Ce domaine peut apporter aussi un grand intérêt aux sociologues. Équiper des personnes avec des capteurs permet d'étudier les interactions humaines et les comportements sociaux [22].

1.4.4 Industrie

Les réseaux de capteurs sont largement utilisés dans le champs industriel, soit dans les chaînes de production, pour la sécurité, ou même dans les produits [26].

- **Contrôle et maintenances dans les équipements industriels**

Les robots industriels complexes sont équipés de centaines de capteurs qui sont généralement connectés par des câbles à un ordinateur principal qui assure le contrôle[26].

- **Sécurité industrielle**

Les grandes usines de nos jours sont équipées par des appareils très complexes, parfois des équipements pour des produits chimiques qui sont dans la plupart du temps toxiques, donc la moindre mauvaise manipulation peut conduire à une catastrophe. Déployé un réseau de capteurs dans un tel environnement permet de détecter et de réagir rapidement à un incendie [26].

- **Moyens de transport**

La plupart des moyens de transport de nos jours (véhicule, avion, ...) sont équipés de dizaines même de centaines de capteurs/actionneurs reliés entre eux en réseau communiquant avec des stations de calcul, des bases de données, ou même avec des satellites pour améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic [26].

1.4.5 Santé

Le champ de contrôle de santé (Health monitoring) représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. On peut distinguer deux grandes classes pour les applications de contrôle de santé :

- **Surveillance médicale**

Les données physiologiques comme la température du corps, la tension artérielle, la quantité de sucre dans le sang, et les pulsations du cœur sont surveillées et automatiquement transmises vers un ordinateur ou un médecin, qui peut les utiliser pour l'exploration et le contrôle médical [22].

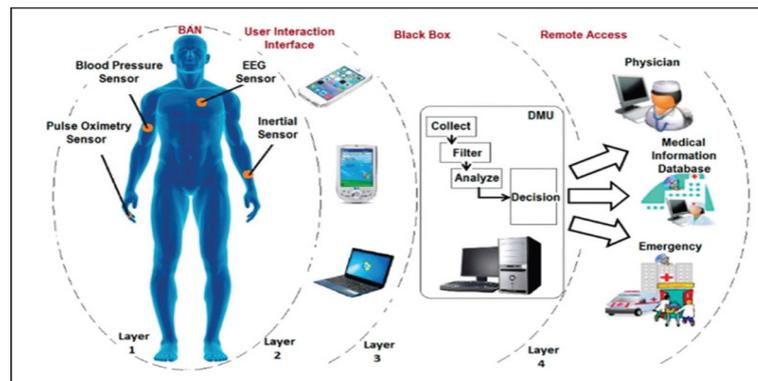


FIGURE 1.6 – Surveillance médicale

S

- **Microchirurgie**

De très petits robots peuvent collaborer pour accomplir une opération chirurgicale microscopique.

1.4.6 Maison, bureau, et vie civile

Les maisons et les bureaux de travail peuvent être équipés de dizaines de capteurs qui surveillent la température et l'humidité pour contrôler la climatisation et le chauffage.

Les PCs (Personal Computer) peuvent être équipés de claviers et souris sans fil et peuvent être reliés entre eux en réseau ad hoc pour faire des travaux collaboratifs et collecter des informations vers une station de calculs pour accomplir un traitement centralisé.

Des réseaux de capteurs peuvent être déployés dans les différentes structures de la ville : ponts, bâtiments, réservoirs d'eau et d'énergie (électricité, carburant, gaz), afin de les surveiller et détecter le moindre danger le plus tôt possible [27].

Un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur. Déconnecter le système ne serait plus aussi simple, puisque il n'existe pas de point critique. Utiliser des réseaux de capteurs dans les routes et les rails permet une meilleure planification urbaine [27].

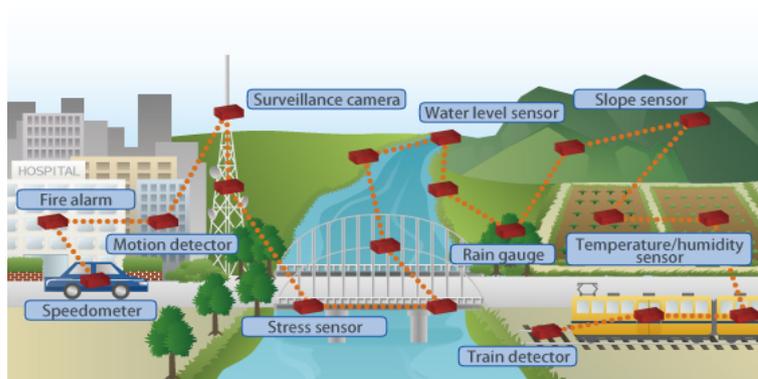


FIGURE 1.7 – Déploiement des capteurs dans l'environnement

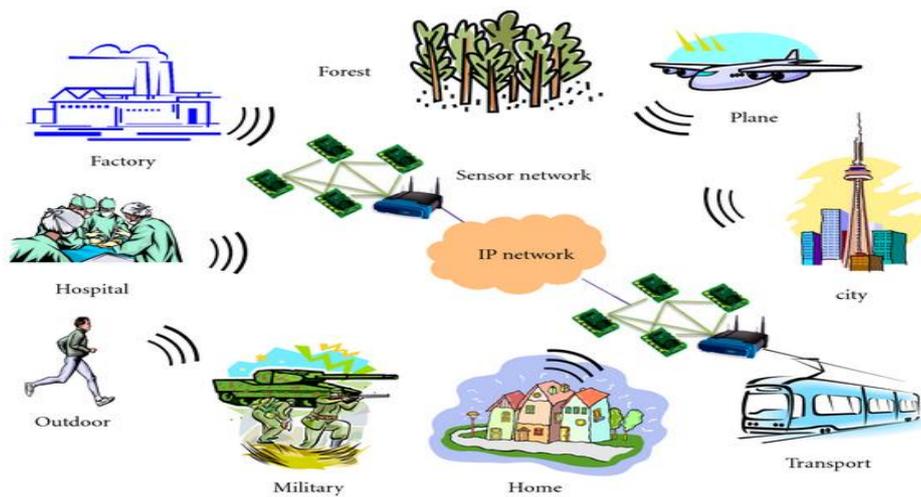


FIGURE 1.8 – Application des capteurs dans les différents domaines

1.5 Plates-formes

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans-fil se retrouvent la double pile protocolaire Bluetooth / ZigBee [38].

1.5.1 Bluetooth

Dont Ericsson a lancé le projet en 1994, a été standardisé sous la norme IEEE 802.15.1 et a comme but la création et le maintien de réseaux à portée personnelle, PAN (Personal Area Network). Un tel réseau est utilisé pour le transfert de données à bas débit à faible distance entre appareils compatibles. Malheureusement, le grand défaut de cette technique est sa trop grande consommation d'énergie et ne peut donc pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui idéalement devraient fonctionner durant plusieurs années [38].

1.5.2 ZigBee

Le ZigBee combiné avec IEEE 802.15.4 offre des caractéristiques répondant encore mieux aux besoins des réseaux de capteurs en termes d'économies d'énergie. Le ZigBee offre des débits de données moindres, mais il consomme également nettement moins que le Bluetooth. Un faible débit de données n'est pas un handicap pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission sont faibles [21,38].

1.5.3 Ultra wideband

De nouvelles techniques influenceront l'avenir des réseaux de capteurs. Par exemple, UWB (Ultra wideband) est une technique de transmission permettant des consommations extrêmement basses grâce à sa simplicité matérielle. De plus, l'atténuation du signal engendré par des obstacles est moindre qu'avec les systèmes radio à bande étroite conventionnels [38].

1.6 Modèle en couches

Le rôle de ce modèle consiste à standardiser la communication entre les composants du réseau afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles. Ce modèle comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que trois couches pour la gestion de la puissance d'énergie, la gestion de la mobilité ainsi que la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs). Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur [10].

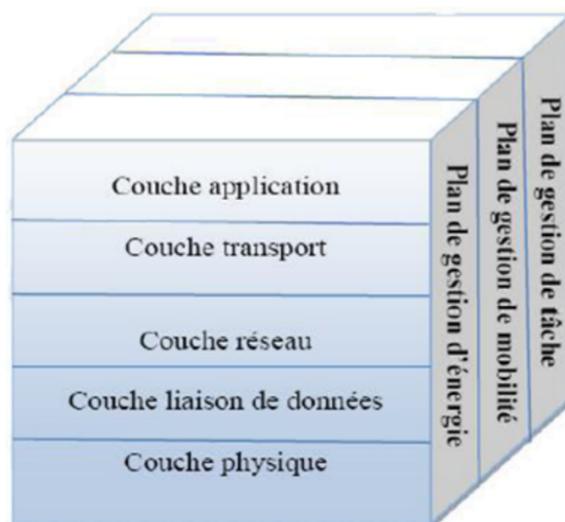


FIGURE 1.9 – Modèle de couches des capteurs

1.6.1 Couche physique

Spécifications des caractéristiques matérielles, des fréquences porteuses, etc [10].

1.6.2 Couche liaison

Spécifie comment les données sont expédiées entre deux noeuds/routeurs dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs,

de l'accès au media, ect. Elle assure la liaison point à point et multi-point dans un réseau de communication [24].

1.6.3 Couche réseau

Dans la couche réseau le but principal est de trouver une route et une transmission fiable des données, captées, des noeuds capteurs vers le puits (sink en anglais) en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs. Ce routage diffère de celui des réseaux de transmission ad hoc sans fils par les caractéristiques suivantes :

- il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de capteurs.
- les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées de sources multiples à un puits particulier.
- les multiples capteurs peuvent produire de mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance).

Les capteur exigent ainsi une gestion soigneuse des ressources. En raison de ces différences, plusieurs nouveaux algorithmes ont été proposés pour le problème de routage dans les réseaux de capteurs [10].

1.6.4 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 [24].

1.6.5 Couche application

Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels [24].

1.6.6 Plans de gestion

Les plans de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches contrôlent l'énergie, le mouvement et la distribution de tâche au sein d'un capteur. Ces plans aident les capteurs à coordonner la tâche de captage et minimiser la consommation d'énergie. Ils sont donc nécessaires pour que les capteurs puissent collaborer ensemble, acheminer les données dans un réseau mobile et partager les ressources entre eux en utilisant efficacement l'énergie disponible. Ainsi, le réseau peut prolonger sa durée de vie [10].

- **Plan de gestion d'énergie**

Il contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le capteur diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée au captage [10].

- **Plan de gestion de mobilité**

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des noeuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les noeuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [10].

- **Plan de gestion de tâche**

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les noeuds 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 noeuds 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 [10].

1.7 Caractéristiques des réseaux de capteurs

1.7.1 Durée de vie limitée

Dans un réseau de capteurs sans fil certains capteurs peuvent tomber en panne ou être bloqués du fait de l'épuisement de leurs batteries ou à cause d'un facteur environnemental

[20].

1.7.2 Ressources limitées

Habituellement les nœuds capteurs ont une taille très petite, ce facteur de forme limite la quantité de ressources qui peuvent être mises dans ces nœuds, en conséquence la capacité de traitement et de mémoire est très limitée [29].

1.7.3 Scalabilité

Le nombre de nœuds d'un réseau dépend de l'application à laquelle est destiné ce réseau. Il peut atteindre plusieurs centaines ou plusieurs milliers [20].

1.7.4 Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide car :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (par exemple un champ de bataille), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Les nœuds capteurs et les nœuds finaux où ils doivent envoyer l'information capturée peuvent être mobiles [29].

1.7.5 Agrégation des données

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs sont très corrélées, ce qui implique l'existence de redondances de données. Les utilisateurs sont intéressés par le phénomène qui est saisi par les données générées par chaque nœud et par conséquent ces réseaux fournissent la possibilité d'agréger les données afin de réduire la largeur de la bande passante [29].

1.8 Facteurs de conception des réseaux de capteurs

1.8.1 Tolérance aux pannes

La tolérance aux fautes est la capacité d'un réseau à maintenir son bon fonctionnement sans aucune interruption. Les pannes des nœuds capteurs ne doivent pas affecter le bon fonctionnement du réseau. La fiabilité $R_k(t)$ ou la tolérance aux fautes d'un capteur est modélisée par une distribution de Poisson qui définit la probabilité de ne pas tomber en panne dans un intervalle de temps $[0, t]$ [20].

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t)$$

Où

λ_k est le taux de pannes d'un nœud capteur k .

t la période de temps.

1.8.2 Scalabilité

Le nombre de nœuds d'un réseau dépend de l'application à laquelle est destiné ce réseau. Il peut atteindre plusieurs centaines ou plusieurs milliers [20]. La densité peut être calculée comme suit :

$$\mu(R) = (N \cdot \pi \cdot R^2)$$

Où :

N est le nombre de nœuds dans la région A .

R est la portée de la transmission radio.

$\mu(R)$ est le nombre de nœud dans un rayon de transmission R d'une région A .

1.8.3 Coûts de production

Les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs. Par conséquent, le prix d'un capteur doit être réduit afin de concevoir un réseau de capteurs abordable [34].

1.8.4 Contraintes matérielles

Un capteur est composé de quatre unités de base et de composants optionnels qui dépendent de l'application. Certaines techniques de routage et tâches de perception nécessitent des informations sur la localisation avec une grande exactitude. Par conséquent un capteur doit être doté d'un système de localisation. Un mobilisateur peut être nécessaire pour déplacer des nœuds afin d'effectuer certaines tâches. Toutes ces sous unités occupent de la place dans un dispositif dont la taille peut être inférieure à 1 cm³. Ajouter à cela le fait que l'autonomie de la batterie des capteurs est très limitée. Compte tenu de tous ces facteurs, les capteurs doivent être disponibles, autonomes et doivent s'adapter à l'environnement [8].

1.8.5 Support de transmission

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont interconnectés à travers une interface de communication sans fil : une liaison radio, infrarouge ou optique. La plupart des réseaux de capteurs utilisent les radios fréquences pour communiquer. Les fréquences radio sont omnidirectionnelles. Il existe des bandes de fréquences internationales à partir desquelles, les réseaux de capteurs allouent leurs bandes, appelées Bandes ISM (Industriel Scientific Médical Bands). Ce sont des bandes de fréquences qui ne sont pas soumises à des réglementations nationales et qui peuvent être utilisées librement (gratuitement, et sans autorisation) pour des applications industrielles, Scientifiques et médicales [14].

1.8.6 Topologie du réseau

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles. La défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles

[21].

1.8.7 Consommation d'énergie

Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie, dans certaines applications, ces nœuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également. Le dysfonctionnement d'un certain nombre de nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs.

1.9 Type de communication dans les RCSFs

Par rapport à l'opération de communication dans un RCSF, nous distinguons deux types de nœud :

- les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteurs).
- les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds (nœuds de relais).

Les données capturées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi-sauts. Comme illustré dans la Figure 1.10 cette organisation logique implique quatre types de communications :

- **La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur (1) :** ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clusterisation (clustering) , où le processus de création de route.

- **La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire (2) :**
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 (3) :**
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.
- **La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire (4) :**
la communication entre ces nœuds est la plupart du temps unicast [29].

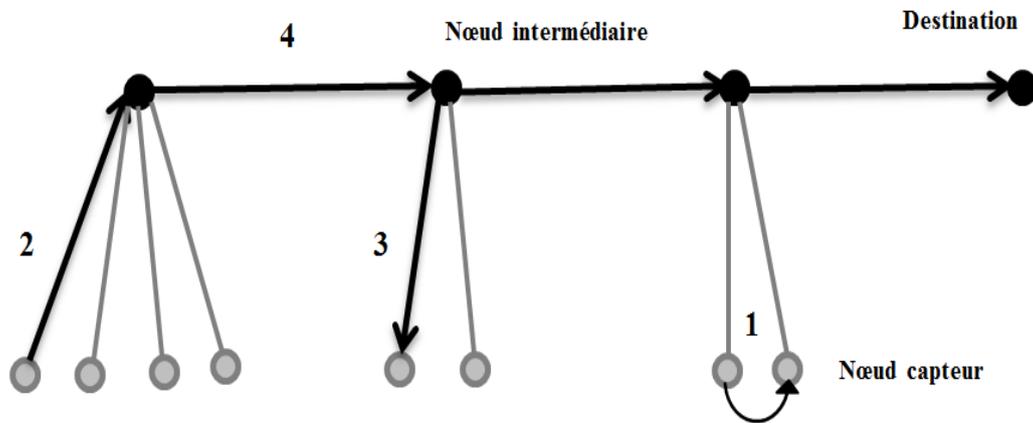


FIGURE 1.10 – types de communication

1.10 Conclusion

Les récents progrès des communications sans fils, des technologies informatiques ont permis l'apparition des réseaux de capteurs sans fil. Ces derniers présentent un champ de recherche qui est encore vierge dans plusieurs axes. Les chercheurs électroniciens sont confrontés à de nombreux challenges, au niveau de la taille des capteurs, mais aussi au niveau des performances. En informatique, les enjeux se situent au niveau des architectures logicielles, du routage, des protocoles de communication et de la qualité de service. L'objectif de notre travail est d'améliorer un protocole de routage qui minimise la consommation d'énergie tout en intégrant la QoS. Dans le chapitre qui suit nous allons expliciter le routage et la qualité de service, puis nous présenterons quelques protocoles intégrant cette dernière.

CHAPITRE 2

ROUTAGE AVEC QOS DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

2.1 Introduction

La conception des protocoles de routage spécifiques aux réseaux de capteurs sans fils a attiré une grande part d'intention des chercheurs dans le domaine. Ceci, car d'une part ces protocoles peuvent varier suivant leurs applications et l'architecture du réseau déployée, et d'autre part, ils doivent surmonter certains défis inhérents qui distinguent ce type de réseau des autres réseaux tels que les réseaux cellulaires ou les réseaux mobiles Ad hoc conventionnels. Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes considérations de conception d'un protocole de routage qui doivent être prises en considération ainsi que les approche de routage. Puis les métriques de Qualité de Service pour mesurer l'efficacité des protocoles. Ensuite nous parlerons des travaux antérieurs et nous les comparerons pour enfin terminer avec une conclusion.

2.1.1 Définition du routage

Le routage est le mécanisme par lequel des chemins sont sélectionnés dans un réseau pour acheminer les données d'un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires [2].

2.1.2 Objectif du routage

L'objectif du routage est de déterminer une route (i.e. un ensemble de liens à parcourir), respectant certaines contraintes, pour établir une connexion d'un noeud source vers un noeud destinataire. Le but d'un algorithme de routage est de permettre le calcul de route entre ces deux noeuds au sens d'un certain critère, et la diffusion des informations nécessaires à ce calcul [1].

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

La consommation d'énergie qui s'avère être un facteur dominant pendant la conception d'un protocole de routage. En effet, dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque noeud joue un rôle dual comme un expéditeur et un routeur de données. Le mal-fonctionnement de quelques noeuds capteurs dû à la défaillance (à cause de la diminution totale d'énergie) peut causer les changements topologiques cruciaux et peut exiger le déplacement des paquets ainsi que la réorganisation du réseau. En plus de ce facteurs d'autres viennent s'ajouter qui sont :

- Déploiement des noeuds.
- Modèle de délivrance des données.
- Hétérogénéité Noeud/Lien.
- Tolérance aux fautes.
- Dynamacité du réseau.
- La scalabilité.
- Media de transmission.
- Connectivité.
- Couverture.
- Agrégation des données.
- Capacité d'un noeud.
- Qualité de service : C'est parmi les facteurs essentiel à prendre en considération lors du routage du fait de la diversité des trafics et selon le besoins spécifiques de

chaqu'un d'entre eux, mais surtout la satisfaction des besoins des applications qui peuvent être des exigences de bande passante, sur les délais de bout en bout ... etc [6].

2.3 Qualité de service

La qualité de service (QoS) ou quality of service (QoS) est la capacité à véhiculer dans de bonnes conditions un type de trafic donné, nous allons dans ce qui suit la définir et présenter ses métriques.

2.3.1 Définition de la Qualité de service

Dans le domaine des réseaux et télécommunications, la qualité de service désigne tout mécanisme permettant d'adapter le comportement du réseau aux besoins des applications, ou bien comme la capacité d'un élément du réseau de fournir un niveau de garantie pour un acheminement des données. La QoS se caractérise comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination. Ces besoins peuvent être traduits par un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables appelés les métriques de la QoS [4].

2.3.2 Métriques de QoS

Les niveaux d'exigences en terme de QoS lié aux besoins des applications sont établis à partir de différents critères ou grandeurs propres aux réseaux tels que :

- **Bande passante** : Pour les réseaux informatiques, le terme de bande passante représente le taux de transfert de données, c'est-à-dire le volume de données pouvant être transporté d'un point à un autre dans un laps de temps donné (généralement une seconde[48]).
- **Délai de bout en bout** : C'est le temps écoulé entre l'envoi d'un paquet par un émetteur et sa réception par le destinataire. C'est une métrique additive où le délai de bout en bout est la somme de tous les délais sur tous les liens le long du chemin.

Garantir le délai, implique la nécessité de mettre en œuvre des mécanismes permettant de gérer au mieux l'acheminement de l'information vers la destination en un temps minimal, tenant compte de trois natures de délais :

- ◊ Délai de propagation : typiquement lié à la topologie du réseau, il dépend de la distance physique qui sépare la source de la destination.
 - ◊ Délai d'attente et de traitement des paquets : à l'intérieur des files d'attente, déterminé par la charge du réseau, ainsi que les politiques de traitement de l'information dans les nœuds pour obtenir une fluidité maximale de l'écoulement de l'information.
 - ◊ Délai de transmission : dépend de la taille des flots. Ce paramètre est lié étroitement à l'utilisation du réseau et au partage de la bande passante [4].
- **Gigue (variation du délai) :** Elle désigne la variation du délai de bout en bout au cours de la transmission. La gigue est due principalement aux délais de traitement variables dans les nœuds du réseau. La gigue aussi est une métrique additive qui est égale à la somme de toutes les giges sur tous les liens le long du chemin [4].
 - **Débit :** Il se rapporte à la quantité de données transférées avec succès depuis un émetteur vers un récepteur en un temps donné [7].
 - **Perte de paquets :** La perte de paquet correspond à la non délivrance d'un paquet de données, la perte de paquets se produit lorsqu'il y a des erreurs d'intégrité sur les données, la plupart du temps due à un encombrement du réseau [19].

Plusieurs stratégies de routage ont été proposées pour les réseaux de capteurs sans fil. Leurs principes de fonctionnement diffèrent suivant la philosophie de la classe à laquelle ils appartiennent. Ces approches peuvent être classifiées suivant : la structure (architecture) du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement des routes et l'initiateur des communications [29]. Nous nous intéressons seulement à la classification selon les fonctions des protocoles et plus précisément au routage basé sur la qualité de service (QoS) [29]. Dans le reste de cette section nous allons présenter quelques protocoles de routage avec QoS dans les RCSFs.

2.4 Quelques protocoles de routage avec QoS dans les RCSFs

La QoS dans le routage a suscité l'intérêt de la communauté scientifique notamment dans les RCSF ce qui les a poussé à développer diverses protocoles de routage avec QoS, dont nous citerons quelques-uns dans ce qui suit.

• SPEED (Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks)

Parmi les premiers protocoles de routage avec QoS. Il a été proposé à l'Université de Virginie. Il fait appel à l'interfonctionnement de plusieurs modules :

- Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding (SNGF) : est le module de routage, responsable de la sélection du prochain saut offrant la vitesse de livraison des paquets souhaitée.
- Paquet de localisation : Les nœuds, exécutant le protocole SPEED, diffusent périodiquement des paquets de localisation pour tenir à jour les changements de la topologie du réseau. Les nœuds récepteurs interprètent les informations reçues et les sauvegardent pour construire leurs tables de voisinage.
- Estimation de délai : joue un rôle très déterminant dans la maintenance et la garantie de la livraison des paquets dans les délais exigés.
- Procédure de ré-routage pour délai : Le protocole utilise une procédure de ré-routage appelée Back pressure rerouting, si en cours de route, on rencontre des nœuds congestionnés

Avec SPEED chaque nœud maintient des informations de localisation sur ses voisins. Il utilise ces informations géographiques pour router les paquets au nœud puits.

Ce protocole essaye de garantir une vitesse constante pour la transmission de paquets dans tout le réseau. Cette vitesse est estimée en divisant la distance entre la station de base par la vitesse du paquet. De plus, ce protocole offre la possibilité d'équilibrage de charge du trafic entre les nœuds du réseau. L'équilibrage de charge est réalisé via la technique adoptée par le module de routage appelé SNGF (Stateless Non-deterministic Geographic

Forwarding) responsable de la sélection du prochain saut en offrant la vitesse de livraison de paquets souhaités. Ceci permet de disperser les paquets sur un domaine de routage plus vaste afin de répartir le trafic uniformément à travers tout le réseau. En s'inspirant de ce protocole, plusieurs autres protocoles ont pu présenter une évolution dans la QoS [7].

Parmi les points forts de ce protocole, il garantit le temps réel et le routage de bout en bout. Par contre il est gourmand en énergie.

• MMSPEED (Multipath Multi SPEED)

MMSPEED a été conçu sur la base de l'approche de conception inter-couche entre le réseau et la couche MAC pour fournir une différenciation de QoS en termes de fiabilité et de délai. Du point de vue de vitesse, MMSPEED étend le protocole SPEED par le biais d'inclusion de plusieurs niveaux de vitesse pour garantir la rapidité de livraison de paquets.

1. Chaque fois qu'un nœud source veut transmettre un paquet de données vers la destination, il détermine la vitesse de l'avancement des paquets de données en fonction de sa distance par rapport à la destination spécifiée et son délai de bout-en-bout.
2. Le classificateur de nœud source sélectionne la couche vitesse correspondante qui peut répondre aux exigences de vitesse de paquet de données. Le module de couche de vitesse sélectionné exécute toutes les décisions subséquentes de routage pour le transfert de paquets de données au cours du processus de transmission de données.
3. Si un nœud intermédiaire reçoit un paquet de données et s'aperçoit que ce paquet ne peut pas respecter son délai spécifié à travers la couche vitesse sélectionnée, le nœud récepteur peut mettre une autre couche de vitesse pour satisfaire l'exigence échéant du paquet [15]

Les avantages de ce protocole est qu'il permet de transmettre les paquets dans les délais exigés, d'éviter les problèmes fréquemment rencontrés comme la congestion et de réduire le taux de perte des paquets. Malheureusement ce protocole ne peut pas soutenir une longue durée de vie des applications.

- **E3MSPEED (Enhanced Mac MMSPEED)**

Ce protocole dérive du protocole MMSPEED. La seule différence entre les deux réside au niveau de la couche MAC. Il apporte quelques optimisations dans le classement et l'ordonnancement des paquets prêts à être transmis. huit catégories de trafic deviennent quatre catégories d'accès qui sont :

- AC-VO : pour les applications temps réels tel que la voix
- AC-VI : pour les applications vidéo.
- AC-BE : pour le trafic 'Best Effort'.
- AC-BK : pour le trafic Background [7] .

E3MSPEED offre les même avantages que MMSPEED mais ce que ce protocole a de plus c'est une meilleur interopérabilité avec un protocole de QoS au niveau de la couche MAC. Ses inconvénients se trouve être que ce protocole ne peut pas soutenir une longue durée de vie des applications.

- **SAR (Sequential Assignment Routing)**

SAR est une approche multi-chemins qui s'efforce à réaliser l'efficacité énergétique et la tolérance aux fautes. SAR crée des arbres en prenant en compte les métriques QoS, la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant ces arbres, des routes multiples du Puit aux capteurs sont formés. Une ou plusieurs routes peuvent, alors, être emprunter [16].

Les points positifs de SAR est qu'il offre moins de puissance de consommation d'énergie et une bonne tolérance aux pannes.

Ses points négatifs est qu'il souffre de frais de maintenance des tableaux et d'états à chaque noeud de capteur en particulier lorsque le nombre de noeuds est énorme.

- **EQSR (Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks)**

Il est l'un des récents protocoles proposés, conçu pour satisfaire la fiabilité, basé sur une variation de la diffusion dirigée et maximise la durée de vie du réseau [15]. Son

fonctionnement est basé sur cinq étapes qui sont :

1. Phase de découverte de routes : Ceci pour établir la route primaire et pour les routes alternatives .
2. Rafraichissement de routes : pour maintenir les chemins et mettre à jour les métriques de la fonction coût.
3. Sélection des routes : Après le calcul des K routes requises, le protocole calcule l routes pour le trafic temps réel et m routes pour le trafic non temps réel, avec : $K=l+m$.
4. Allocation du trafic et transmission de données : EQSR emploie deux files d'attente pour séparer le trafic temps réel (priorité) et non temps réel (FIFO). Le schéma d'allocation de trafic découpe le paquet en segments égaux et ajoute un code de correction d'erreur pour assurer la fiabilité de la transmission et augmenter la résilience des échecs de routes. Ensuite il ordonnance les sous paquets simultanément pour la transmission à travers les routes valables. Les parties sont collectées et rassemblées au niveau du Puit et le message original est reconstruit.
5. Transfert des données à travers les multiples routes : Le transfert de données est réalisé en deux étapes qui sont Segmentation et codage de données ensuite Expédition et reconstitution de données.

Les atouts de ce protocole sont qu'il maximise la durée de vie du réseau en équilibrant la consommation d'énergie sur plusieurs nœuds. Il utilise la différenciation de service pour retarder le trafic sensible et fournit moins de retard et un bon débit grâce à l'utilisation de chemins multiples.

Les inconvénients se trouve être qu'il ne peut pas atteindre les exigences de délai lorsque la charge est augmentée. Il peut être utilisé pour la transmission de données en continu ou pour des applications événementielles.

- **MCMP (A Multi Constrained QoS Multi-Path routing)**

C'est un protocole de routage multivoies à QoS et à contraintes multiples. Il utilise des routes pour livrer des paquets au nœud de destinataire conformément à certaines

exigences de QoS qui sont la fiabilité et de délai. Le problème du retard de bout en bout est formulé sous la forme d'un problème d'optimisation et ensuite un algorithme basé sur la programmation d'entiers linéaires est appliqué pour résoudre le problème. L'objectif du protocole est d'utiliser les chemins multiples pour augmenter les performances du réseau avec un coût d'énergie modéré. Cependant, le protocole achemine toujours l'information sur le chemin d'accès qui inclut le nombre minimum de sauts pour satisfaire à la QoS requise, ce qui conduit à une consommation d'énergie dans certains cas [36]. Ce protocole assure la fiabilité et le délais, mais entraîne des fois une consommation accrue en énergie.

- **DCEMRA (Delay Constrained Energy-efficient Multi-hop Routing Algorithm)**

L'algorithme utilise des agents intelligents afin de déviser le réseau et la mise en cluster équilibrées et de trouver le chemin de routage à faible coût. Ils sont aussi utiliser pour rechercher tous les itinéraires propables dans et entre les clusers [11].

Les avantages qu'on peut citer concernant DCEMRA sont l'efficacité énergétique car l'utilisation d'agent réduit la consommation d'énergie tout en fournissant les chemains fiable à débit, mais aussi permet la mise en cluster avec coût peu élevé. Par contre ce protocole ne considère pas le délais de bout en bout.

- **QEMPAR (QoS and Energy Aware Multi-Path Routing Algorithm for Real-Time Applications in Wireless Sensor Networks)**

QEMPAR a été conçu pour les applications temps réel. Il fonctionne comme suit lors de la phase de découverte un nœud utilise la fonction de convenance de lien pour sélectionner son prochain saut :

$$N_H = \max_{B \in N_A} \left\{ PPS_B + APPR_{N_B} + \frac{1}{I_B} + \frac{Er_B}{E_i} \right\}$$

avec :

N_H : le nœud sélectionné au prochain saut.

PPS_B : La probabilité de l'envoi de paquet du nœud B.

$APPR_{N_B}$: La moyenne de probabilité de la réception du paquet par tous les voisins de B.

I_B : L'interférence du lien entre A et B (SNR).

Er_B : L'énergie résiduel du nœud B.

E_i : L'énergie initial d'un nœud.

Chaque nœud obtient les informations sur ses voisins par échange de beacons et mets à jour sa table de routage. Chaque nœud possède maintenant les informations nécessaires pour calculer les convenances de liens. Pour l'envoi rapide des paquets et diminuer le délai de bout en bout, après la phase de découverte de routes :

- La source divise le paquet temps réel en un ensemble de petits paquets avec des numéros de séquences.
- La source collectionne les routes en plusieurs classes selon le nombre de saut.
- La source envoie ensuite chaque petit paquet à travers une route différente.
- Pour assurer la réception consécutive des petits paquets au niveau du Puit le paquet avec le petit numéro de séquence est envoyé à travers la route avec le minimum de nombre de saut (du minimum au maximum).[15]

Parmi les point fort de ce protocole est qu'il prolonge la durée de vie du réseau adapté aux applications en temps réel. Par contre la collection des routes est peu fiable et il ne prend pas en considération les limites des capteurs.

• AntSensNet

Il est proposé par Cobo et al [35], il est basé sur l'algorithme de fourmi. Les exigences de qualité de service établissent une structure hiérarchique sur le réseau avant de choisir un chemin approprié. Pour obtenir une transmission de distorsion vidéo minimale, AntSensNet peut utiliser une planification efficace de paquets vidéo à plusieurs chemins. L'architecture fonctionne en trois étapes :

- Regroupe d'abord les nœuds en colonies.
- Sélectionne des cluster head. Pour cela il utilise des agents spéciaux (fourmis) de manière totalement distribuée. Chaque nœud de capteur diffuse un paquet HELLO

et stocke ses informations dans le tableau. Les informations stockées sont ensuite utilisées pour décider comment rejoindre la découverte de cluster et d'itinéraire.

- Le récepteur libère les messages de contrôle dans les réseaux.

Lorsqu'un nœud de capteur souhaite envoyer des informations au collecteur, ces informations sont directement envoyées aux CH, puis il vérifie le tableau de routage pour sélectionner l'itinéraire approprié en vue d'une transmission ultérieure. Pour trouver une telle route, AntSensNet utilise diverses fourmis, également appelés paquets de contrôle tels que fourmi arrière (BANT), fourmi avancée (FANT), route entretenue (MANT) et transmission de données (DANT). AntSensNet utilise le modèle de mise en file d'attente pour la différenciation des services de trafic [35].

Les avantages de ce protocole se trouvent être qu'il est plus approprié pour le trafic en temps réel car il réduit le délai et maximise le ratio de paquet de données délivré avec succès. L'algorithme permet d'obtenir une évolutivité et améliore également le mécanisme d'aggrégation de données en raison de la structure hiérarchique [35].

Le principal inconvénient de l'algorithme est qu'il ne tient pas compte des paramètres de qualité de service tels que l'énergie et le débit. Les frais généraux de contrôle sont grandes dans le processus d'organisation du trafic [35].

• AntMQoS

C'est un protocole basé sur l'algorithme de fourmi réactif avec multiples QoS conçu pour les capteurs hétérogènes où les cluster heads regroupent les données hétérogènes du trafic généré par les nœuds capteurs et prend en charge de manière indépendante les décisions de routage basées sur les besoins du trafic et détermine de multiples chemins optimaux entre le CH et le nœud puit.

Dans AntMQoS, chaque CH gère deux tables la table des voisins et la table de phéromone.

Quand le CH veut communiquer avec le nœud collecteur S, il génère une (FANT) pour rechercher un chemin optimal pour la classe de trafic appropriée du paquet. Ces dernières conservent les enregistrements des nœuds intermédiaires. un nœud prend la

décision probabiliste pour choisir la prochaine noeud de saut selon l'équation suivante :

$$P_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij}^k)^\alpha (\eta_{ij}^k)^\beta}{\sum_{s \in N_i^k} (\tau_{is}^k)^\alpha (\eta_{is}^k)^\beta}$$

Où

P_{ij}^k est la probabilité de sélection du prochain noeud j du trafic de la classe k.

τ_{ij}^k désigne la valeur de la phéromone du noeud j.

$\eta_{ij}^k = \frac{ER_{ij}}{D_{ij}TPP}$ désigne le facteur heuristique du noeud j pour la classe de trafic k, tel que :

ER_j l'énergie résiduel du noeud j.

D_{ij} le délai de transmission de i à j.

TPP le Taux de Paquets Perdu.

α, β sont respectivement les paramètres de contrôle du phéromone et de l'heuristique.

N_i^k est l'ensemble des noeuds voisins de i [17].

les points fort de ce protocole est qu'il réduit le nombre d'overhead, offre un délais minime, minimise le nombre de packets perdu, permet une utilisation efficace en énergie et augmente la durée de vie du réseau.

Par contre il souffre de quelques inconvénients qui se trouve être qu'il ne considère pas le débit et ne prend pas en compte le délais de bout en bout.

• OQoS-CMRP(Optimized QoS-based Clustering with Multipath Routing Protocol)

O. Deepa, J. Suguna ont propose OQoS-CMRP en 2017. C'est un protocole hiérarchique qui est devisé en quatre étapes. La première est la phase de formation des clusters à l'aide d'un algorithme basé sur OEP optimisation par essais particuliers (ou PSO en anglais). La seconde phase consiste à déterminer les chemins en prenant en compte les métrique (délai, énergie, fiabilité et le délai de bout en bout) en calculant les coûts pour chaque lien en attribuant un poid pour chaque fonctions calculant l'une des métriques précédentes. La troisième phase est celle de transmission des données et la quatrième pour le reroutage et le reclustering. Ce protocole est caractérisé par une fiabilité de délivrance des données prise en compte avec le reroutage de ces dernières, la réduction du délai, du délai de bout en bout et de la consommation d'énergie. Par contre il présente quelques

défauts qui se trouve être qu'il ne prend pas en compte le débit, la sécurité et la mobilité [39].

- **PDORP (PEGASIS-DSR Optimized Routing Protocol)**

Dans PDORP la méthode de routage proposée exploite les caractéristiques de la méthode Proactive (PEGASIS) et de la méthode réactif (DSR). Ainsi, la solution proposée est de créer une liste de confiance pour le premier temps dans chaque tour à base des paramètres alloués aux nœuds. Après chaque tour, la liste de confiance est mise à jour et après un certain nombre de tours, la confiance ne serait pas vérifiée pour éviter les retards. En fin, l'algorithme hybride sera utilisé pour créer la valeur d'aptitude de la liste de confiance de l'algorithme[13].

Parmi les avantages de ce protocole on trouve un haut débit et une utilisation efficace de l'énergie. Malheureusement ce protocole présente une fiabilité réduite et un délai insuffisant.

- **QDAR (A Q-Learning-based Delay-Aware Routing algorithm to Extend the Lifetime of Underwater Sensor Networks)**

Ce protocole a été proposé par Zhigang Jin, Yingying Ma, Yishan Su, Shuo Li, and Xiaomei Fu en 2017. Le mécanisme QDAR peut s'adapter rapidement à l'environnement sous-marin dynamique. Utilise une fonction de coût liée à l'énergie et une fonction de coût liée au délai qui sont définies. Après cela, le nœud collecteur dispose des informations collectées et exécute l'algorithme QDAR. Premièrement, il définit deux fonctions de récompense avec les fonctions de coût pour une transmission réussie ou non. Dans les fonctions de récompense, une stratégie de chemin de détournement adaptatif est conçue. Ainsi, l'algorithme QDAR peut fonctionner de manière adaptative avec différentes énergies résiduelles. Ensuite, avec les fonctions de récompense et les fonctions de probabilités correspondantes, la fonction d'action-utilité (valeur Q) est déterminée. Enfin, le nœud récepteur choisit le saut optimal global, puis détermine le chemin de routage.

L'algorithme QDAR peut prolonger la durée de vie du réseau en répartissant uniformément l'énergie résiduelle et en réduisant le délai de bout en bout, maximise le taux des

paqués livré avec succès. Cependant il ne prend pas en considération le débit ni l'aspect sécurité des données [41].

• **BFEQM (Balanced and Flexible Energy Efficient and QoS based Multipath routing)**

C'est un protocole de routage utilisé dans RCSFs de type BAN dans le domaine de la santé. Il est caractérisé par trois phases :

- Phase de découverte de voisinage : cette phase permet de trier les voisins de chaque nœud [3].
- Phase de découverte de chemins : Cette phase permettra de déterminer les meilleurs chemins pour la transmission du trafic en temps réel et les chemins alternatifs pour la transmission du trafic non temps réel [3].
- Phase de communication de données : Si le trafic non réel est beaucoup plus important que le trafic réel alors les données non urgentes seront transmises dans les meilleures conditions de performance du moment que les meilleurs chemins sont en chômage ce qui permet l'équité entre tous les chemins et leurs ressources [3].

Les avantages de ce protocole est qu'il permet de garantir une flexibilité et une standardisation du modèle pour supporter tout type d'application, de prolonger la durée de vie du réseau, d'augmenter le taux de livraison des données, de minimiser les délais de bout en bout.

Ses inconvénients se trouvent être que les performances de ce protocole sont réduites pour des réseaux de capteurs de grande taille, qu'il souffre de problèmes d'overhead lorsqu'il y a un nombre important de nœuds.

• **EERP(Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks)**

C'est le protocole qu'on a choisi d'améliorer. La caractéristique principale de ce protocole 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 [29]. Le protocole EERP agit en quatre phases pour acheminer les données depuis des stations sources vers une station destinataire qui sont :

- Phase de connaissance : la station de base va diffuser un message broadcast qui permet aux nœuds voisins de se reconnaître.
- Phase de transmission des données : Elle consiste à choisir le prochain nœud qui va recevoir ces données avec le minimum d'énergie de transmission.
- Phase de maintenance des routes : Afin de déterminer les nouveaux voisins, ou bien à supprimer les voisins inopérants) et modifier les niveaux des énergies de ses voisins ainsi que leurs valeurs de fonction coût et les états.

Ce protocole a démontré son efficacité énergétique. Il utilise une politique de gestion d'énergie qui permet d'équilibrer le niveau d'énergie de différents nœuds et de ce fait augmente la durée de vie du réseau. Intègre comme paramètre de qualité de service la fiabilité, en utilisant de multiples chemins. L'inconvénient majeur de ce protocole c'est qu'il ne prend pas en considération les paramètres de qualité de service comme le débit, le délai etc.

2.5 Comparaison des différents protocoles avec QoS

protocoles	Durée de vie du réseau	DDR	fiabilité	délais	utilisation efficace d'énergie	overhead	débit
1.SPEED	non	non	non	oui	non	oui	oui
2.MMSPEED	non	oui	oui	oui	non	oui	oui
3.E3MSPEED	non	oui	oui	oui	non	oui	oui
4.SAR	non	non	oui	oui	oui	oui	non
5.EQSR	non	oui	non	oui	oui	non	non
6.MCMP	non	non	oui	oui	non	non	non
7.DCEMRA	oui	non	oui	oui	oui	non	oui
8.QEMPAR	non	oui	oui	oui	non	oui	oui
9.AntSensNet	non	oui	non	non	non	non	non
10.AntMQoS	oui	oui	non	oui	oui	non	non
11.OQoS-CMRP	oui	oui	non	oui	oui	oui	non
12.PDORP	oui	oui	non	non	oui	non	oui
13.QDAR	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
14.BFEQM	oui	oui	oui	non	oui	oui	non
15.EERP	oui	non	oui	non	oui	non	non

TABLE 2.1 – Comparaison entre les différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs.

Discussion

D'après la table ci-dessus (Tab.2.1) nous avons remarqué que chaque protocole est bon par rapport à des critères de comparaison, cependant, il est mauvais par rapport à d'autres. Ce qui nous permet de dire qu'il est difficile de concevoir un protocole qui supporte tous ces critères.

2.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs. L'étude de ces protocoles nous a permis de les comparer, et de mettre en relief les avantages et les inconvénients des stratégies de routages adoptées par chacun d'eux. Bien que plusieurs de ces stratégies paraissent prometteuses, il existe toujours certains défis qui persistent et nécessitent leur prise en considération par les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs. Nous nous intéressons par la suite à l'amélioration du protocole de routage EERP performant en terme de consommation d'énergie en intégrant une nouvelle métrique qui est la QoS. Dans le chapitre qui suit nous détaillerons EERP et sa nouvelle variante EERP-QoS.

CHAPITRE 3

NOTRE PROTOCOLE DE ROUTAGE EERP-QOS

Introduction

Au cours du chapitre précédent, nous avons étudié un ensemble de protocoles et nous les avons comparés pour dire que chacun est bon pour certains critères et moins bon pour d'autres. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'un de ces protocoles c'est à dire EERP, qui est performant en termes de consommation d'énergie, nous voulons l'améliorer pour qu'il intègre la taille de la mémoire tampon restante, le rapport du signal sur le bruit (SNR). Dans ce qui suit, nous décrirons en détail le fonctionnement de EERP, nous citerons ses avantages et ses inconvénients, nous proposerons le protocole EERP amélioré, nous le modéliserons avec les réseaux de Pétri ensuite nous procéderons à son évaluation et nous clôturerons avec une conclusion.

3.1 Description de EERP

Le protocole EERP est un protocole très performant en termes de conservation d'énergie, cette efficacité énergétique est due au fait qu'un nœud capteur se base sur l'énergie résiduelle de ses voisins afin de les classifier comme des voisins concernés ou bien non concernés vis-à-vis de l'acheminement des données capturées, ainsi qu'une fonction de coût en termes de consommation d'énergie pour établir un lien, une route de moindre

coût entre lui et la station de base. Le protocole EERP fonctionne en trois phases qui sont :

- phase de connaissance.
- phase de transmission.
- phase de maintenance.

●Phase de connaissance

Le protocole commence par la phase de connaissance pour cela, la station de base va diffuser un message broadcast NEIDET (NEIghbourhoods DETection) qui permet aux nœuds voisins de se reconnaître. Quand un nœud i reçoit ce message, il va vérifier si le nœud $j \in N_i$ qui a émit NEIDET existe entre lui et la station de base, ce test se fait suivant la métrique de distance suivante :

$$d(i, j) \leq R_i.$$

et

$$d(i, SB) < \sqrt{d(i, j)^2 + d(i, SB)^2}$$

Où :

SB : représente la station de base.

R_i : représente la portée d'un nœud i .

$d(i, j)$: représente la distance entre le nœud i et le nœud j .

$d(i, SB)$: représente la distance entre le nœud i et la station de base SB.

Après que le nœud j a vérifié ce test, le nœud i va ajouter une entrée dans sa table NIT pour le nœud j . Dans cette dernière, il va mettre l'identifiant du nœud j avec son niveau d'énergie, son f_j^i et son état (concerné ou non). Tel que un nœud est concerné si son énergie résiduel est supérieur à la valeur du seuil d'énergie α_i et non concerné sinon. La valeur de α_i est égal à la moitié du maximum de l'énergie restante des voisin du nœud i .

Le nœud i à son tour va diffuser le même message NEIDET qui comporte :

- Son identifiant.
- Son niveau d'énergie.
- Ainsi que le coût f_i du chemin minimum en terme d'énergie menant depuis ce nœud i vers la station de base. Tel que :

$$f_i = \min f_j + \frac{1}{ER_i}$$

$$f_j^i = f_j + c_j^i$$

$$c_j^i = (E_e + E_r)_{ij}$$

E_e et E_r sont respectivement l'énergie d'émission et de réception sur le lien ij .

L'opération se répétera jusqu'à collecte des informations auprès de tous les nœuds. L'organigramme suivant permet de mieux expliciter cette phase.

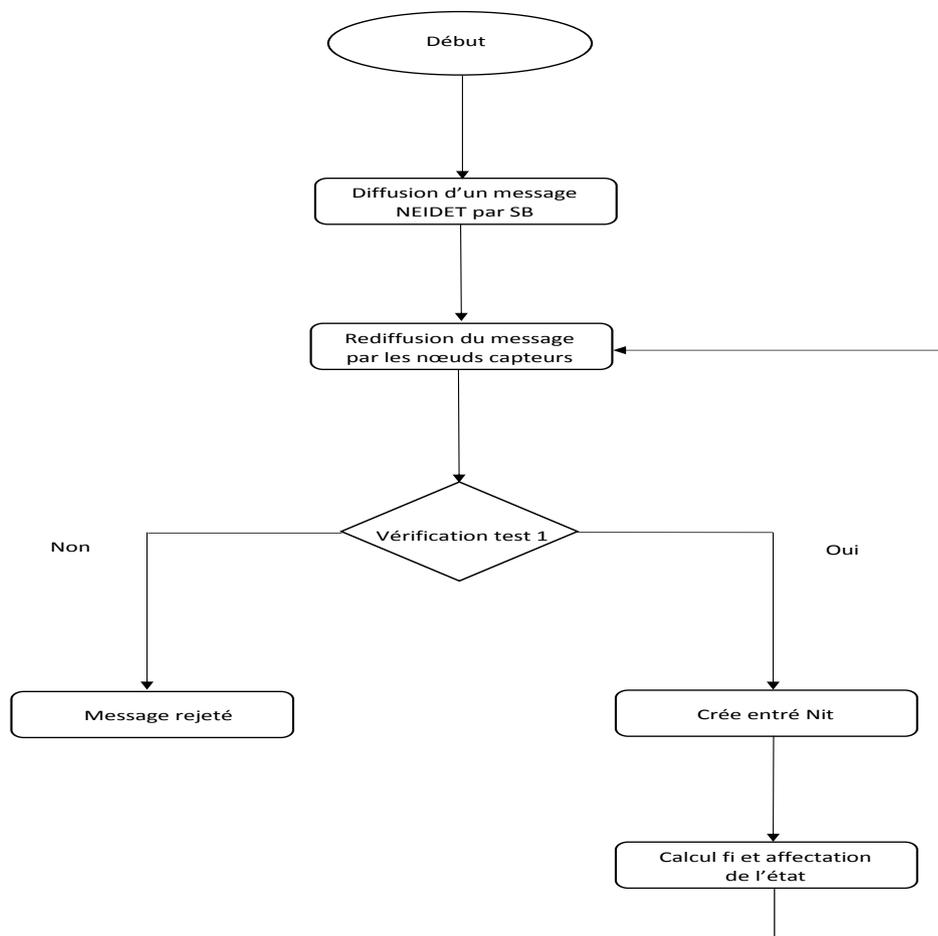


FIGURE 3.1 – Phase de connaissance

Où :

test 1 représente :

$$d(i, j) \leq R_i.$$

et

$$d(i, SB) < \sqrt{d(i, j)^2 + d(i, SB)^2}$$

•Phase de transmission

Quand ces données seront collectées vient la phase de transmission des données. Lors de la détection d'un événement le noeud passe de l'état passif à l'état actif. Pour choisir le prochain saut afin d'acheminer les données. Le noeud qui va être sélectionné doit être parmi les noeuds concernés avec le f_i minimum. S'il ne possède aucun noeud concerné, dans ce cas on redétermine un nouveau seuil d'énergie α_i puis les états de ses voisins suivant la valeur de α_i . L'organigramme suivant récapitule le déroulement de cette phase.

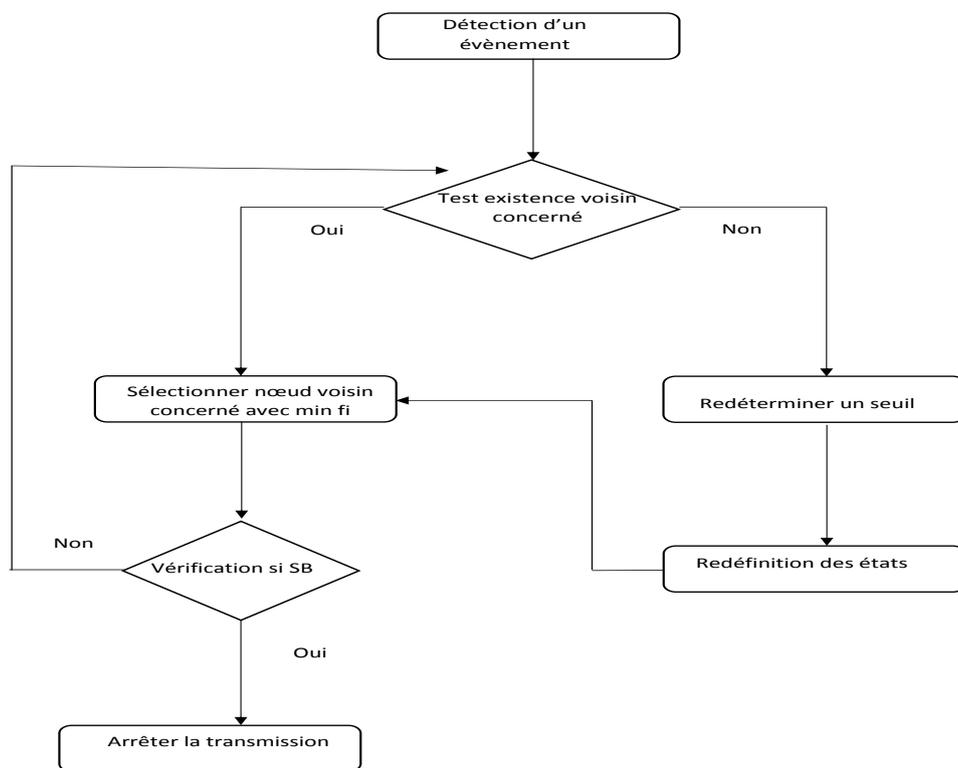


FIGURE 3.2 – Phase de transmission

•Phase de maintenance

La station de base va diffuser un message broadcast NEIDET (NEIghbourhoods DETection) comme dans la phase de connaissance. Quand un nœud i reçoit le message NEIDET il vérifie l'existence de l'émetteur, s'il n'existe pas il va créer une entrée dans sa table NIT, sinon il met à jour les informations de l'émetteur tel que le niveau d'énergie ainsi son f_i et l'état (concerné ou non). L'organigramme suivant permet de mieux expliciter cette phase.

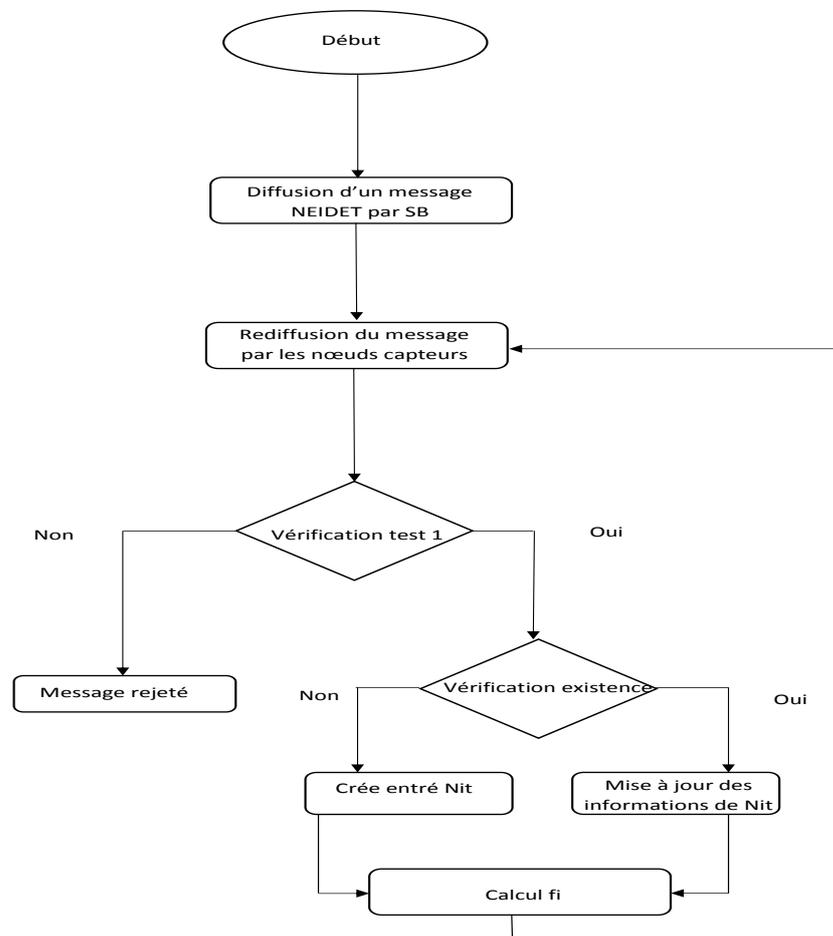


FIGURE 3.3 – phase de maintenance

test 1 représente :

$$d(i, j) \leq R_i.$$

et

$$d(i, SB) < \sqrt{d(i, j)^2 + d(i, SB)^2}$$

- **Avantages de EERP**

- EERP réduire significativement la perte énergétique.
- Il permet d'équilibrer la durée de vie de tous les nœuds, en exploitant plusieurs chemins et par conséquent, augmente la fiabilité et la durée de vie du réseau.

- **Inconvénients de EERP**

- EERP n'intègre pas l'agrégation des données au niveau de chaque nœud pour éliminer les données redondantes.
- Il ne prend pas en paramètre la qualité de service tel que le délai de transmission, le débit etc.

3.2 EERP Amélioré (EERP-QoS)

Tel qu'on a cité auparavant, ce protocole souffre de quelques lacunes dont la qualité de service tel la gigue, le délai, le débit. Pour cela, nous l'avons amélioré en proposant le protocole EERP-QoS qui est une variante de EERP. Notre amélioration se portera sur l'intégration de la QoS et plus précisément sur la qualité du lien et la réduction de la congestion en considérant la taille du buffer. Pour l'apport au protocole EERP on s'est inspiré de QEMH (QoS based and Energy aware Multi-path Hierarchical routing algorithm in WSN) [12]

3.2.1 Objectifs de EERP-QoS

Notre objectif est d'améliorer la qualité d'une transmission d'information et réduire la latence en introduisant deux paramètres additifs qui sont le rapport signal sur bruit et la taille du buffer.

Le rapport signal/bruit (Signal to Noise Ratio ou SNR en anglais), appelé encore rapport signal à bruit, permet de mesurer la qualité d'un canal de transmission. C'est un nombre sans unité qui est d'autant plus grand que le bruit est négligeable. SNR désigne

le rapport entre la grandeur d'un signal (information utile, significative) et celle du bruit (information inutile, non significative) [45].

Deux types de mémoire coexistent dans un capteur. La mémoire vive (RAM ou SRAM) permet le fonctionnement de l'application. La mémoire morte (principalement de la mémoire flash) stocke le système d'exploitation et les données traitées par le capteur. La taille typique de la mémoire RAM est de l'ordre de 128 ko, alors que la taille de la mémoire flash atteint quelques Mo [46]. Le débordement des mémoires temporelles est un type de congestion qui peut causer le retard de l'information, la perte des paquets qui contiennent parfois des informations critiques [47]. La formule suivante montre la nouvelle fonction coût avec qualité de service.

$$f_{iQoS} = f_i + \frac{1}{L_{pij}} + \frac{1}{B_{bufferj}}$$

où

$$f_i = \min f_j^i + \frac{1}{ER_i}$$

$$L_{pij} = \frac{SNR_{ij}}{Distance_{j-SB}}$$

SNR_{ij} désigne (Signal to Noise Ratio) entre le noeud i et j $Distance_{j-SB}$ est la distance entre le noeud j et la station de base.

$B_{bufferj}$ c'est la taille du buffer du noeud j.

La forme des organigrammes conceptuels des phases de EERP-QoS qui sont :

- Phase de connaissance.
- Phase de transmission.
- Phase de maintenance.

auront la même forme que ceux de EERP, la seule différence est au niveau de la fonction coût, au lieu de f_i on aura f_{iQoS} . Ici bas nous décrivons dans Algorithme 1 et Algorithme 2 les deux algorithmes de réception d'un message NEIDET ainsi que d'un message Data .

Algorithme 1 Reception NEIDET**Entré**

Soit N_j les voisins de N_i ;

Soit ER_j est l'énergie résiduel du noeud N_j ;

Soit NIT_i les voisins du noeud N_i vérifiant test 1 ;

Soit α_i le seuil d'énergie demandé pour les voisins du noeud N_i ;

Sorti

Mise à jour des information NEIDET ;

Début

Pour $i = 1$ jusqu'à nombre NEIDET reçu à N_i **faire**.

Si (N_j est entre SB et N_i) **alors**

Si (N_i n'existe pas) **alors**

créer entré NIT ;

else

Mise à jour entré NIT ;

Fin Si

Si ($ER_j > \alpha_i$) **alors**

etat(N_j)=concerné ;

else

etat(N_j)=non concerné ;

Fin Si

Calculer f_{iQoS} ;

Sinon

Jeter le paquet ;

Fin Si

Fin pour

Mise à jour information et broadcast NEIDET ;

Fin

Algorithme 2 Reception d'un paquet DATA**Entré**

Soit SB la station de base ;

Soit i le capteur i ;

Soit j le j_{ime} voisin du capteur i ;

Soit VoisinConcerne(i) l'ensemble de voisins concernés du noeud capteur i ;

Soit NumberVoisins(i) le nombre de voisins concernés du noeud capteur i ;

Soit α_i le seuil d'énergie du noeud capteur i ;

Soit f_j le coût du chemin menant à SB depuis le noeud capteur i ;

Sorti

Envoyer les données à la SB ;

Début

Lors de la réception d'un paquet DATA ;

Tant que (récepteur différent de SB) **faire**

Si(NumberVoisins(i) $<>$ 0) **alors** ;

Choisir le voisin j depuis l'ensemble VoisinConcerne(i) avec f_j minimum ;

else

Déterminer un nouvel α_i ;

Déterminer VoisinConcerne(i) parmi les voisins existants au niveau de NIT ;

Choisir le voisin j depuis l'ensemble VoisinConcerne(i) avec f_j minimum ;

Fin Si

Envoyer du paquet de données au voisin j ;

Fin Tant que

Fin

3.3 Modélisation de EERP-QoS avec les Réseaux de Pétri

Le choix du langage de modélisation est une étape clé dans le processus d'évaluation des systèmes. En effet il doit à la fois être en mesure d'exprimer toutes les propriétés

caractéristiques du modèle ainsi que les propriétés à valider. Pour cela, nous avons opté pour les réseaux de Pétri. En effet, ils se basent sur un formalisme états/transitions permettant l'expression du routage et du partage d'informations. Nous avons choisi comme outil CPN Tools. Ce dernier permet d'offrir une aide à la modélisation, la simulation et l'analyse des RdP.

3.3.1 Réseaux de Pétri

• Définition

Un RdP est un graphe biparti dont on particularise les deux familles de sommets, qui sont les places représentées par des cercles qui permettent de décrire les états du système modélisé et les transitions représentées par des traits ou des rectangles qui représentent les changements d'états. Interpréter un réseau de Petri, c'est d'abord donner un sens concret à un modèle mathématique en associant des places, des transitions et des jetons à des entités existantes. Ainsi, les places peuvent être interprétées comme des activités d'un système à événements discrets. On peut faire correspondre aux transitions des événements. On peut également leur associer des activités ou des procédures à condition qu'elles soient indivisibles ou encore ininterrompibles. Les jetons peuvent être interprétés comme des objets physiques, des informations, des structures de données ou des ressources. Ces entités sont soumises à des événements (franchissement de transitions) qui les font changer d'état (passer d'une place à une autre). Le modèle de RdP nous donne des techniques pour analyser les propriétés qui sont les caractéristiques qui permettent d'évaluer la qualité d'un système donné [49]. Parmi les propriétés des RdP on citera dans ce qui suit les plus importantes d'entre elles :

Réseau borné : La bornitude d'un RdP exprime le fait que le nombre d'états que peut prendre le système modélisé par ce RdP est fini [49].

Réseau sans blocage : Un RdP est dit bloqué si à une certaine étape son franchissement s'arrête et aucune transition n'est franchissable [49].

Vivacité : La vivacité est une propriété importante pour traduire le bon fonctionnement

d'un système. D'ailleurs, un réseau vivant modélise un système en fonctionnement permanent sans aucun blocage [49].

Etat d'accueil : Un état d'accueil caractérise le fait que le système peut se retrouver dans cet état à partir des marquages en aval. Si le marquage initial est un état d'accueil, cela signifie que l'on peut toujours réinitialiser le système [49].

Réversibilité : Un RdP est dit réversible si son état initial est un état d'accueil [49].

Graphe fortement connexe : C'est un sous graphe tel qu'il existe un chemin (orienté) entre tout point A et tout point B de ce sous graphe. Un graphe est dit fortement connexe s'il possède une seule composante fortement connexe [49].

Il existe plusieurs simulateurs de Réseaux de Petri TINA, CPN, etc. Dans notre mémoire nous avons choisi CPN TOOLS.

•Outil de modélisation CPN (Colored Petri Net) TOOLS

◊Présentation du logiciel

CPN TOOLS est un outil de modélisation et de simulation des systèmes à événements discrets modélisés avec les RdP. CPN Tools a été développé par le CPN Group de l'Université d'Aarhus entre 2000 et 2010. Les principaux chercheurs qui l'ont développés sont Kurt Jensen, Soren Christensen, Lars M. Kristensen, et Michael W [5].

Il permet de représenter les différentes familles de RdPC, les RdP simples, les RdP temporisés et les RdP Stochastiques. De plus, CPN Tools permet aussi de simuler les RdPC Hiérarchiques.

Nous avons implémenter le protocole EERP-QoS sous CPN tools et nous avons pu avoir la FIGURE 3.4 l'illustrant. Après simulation, CPN nous a fournis le rapport de ce réseau FIGURE 3.5 et FIGURE 3.6 afin d'analyser les caractéristique de ce RdP.

Où :

test 1 représente :

$$d(i, j) \leq R_i.$$

et

$$d(i, SB) < \sqrt{d(i, j)^2 + d(i, SB)^2}$$

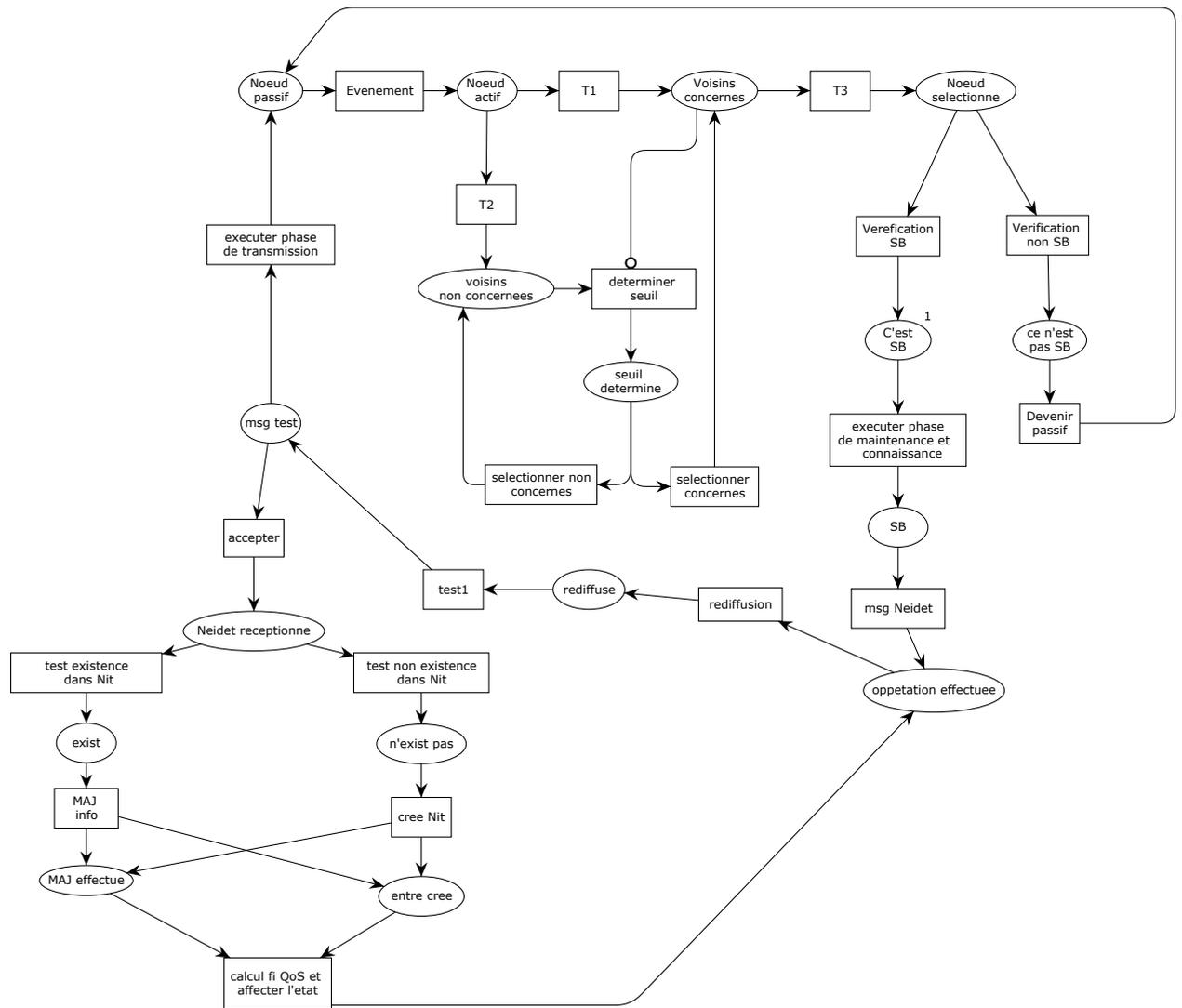


FIGURE 3.4 – EERP-QoS avec RdP

T1 vérification existence voisins concerné.

T2 vérification existence voisins non concerné.

T3 choisir voisin concerné avec f_i minimum.

```
CPN Tools state space report for:  
/cygdrive/C/Users/katia/Desktop/cpn/Phase de transimition.cpn  
Report generated: Fri Jun 21 10:47:39 2019
```

Statistics

```
State Space  
Nodes: 16  
Arcs: 21  
Secs: 0  
Status: Full
```

```
Scc Graph  
Nodes: 1  
Arcs: 0  
Secs: 0
```

FIGURE 3.5 – Rapport 1

Home Properties

```
Home Markings  
All
```

Liveness Properties

```
Dead Markings  
None
```

```
Dead Transition Instances  
None
```

```
Live Transition Instances  
All
```

FIGURE 3.6 – Rapport 2

D'après la FIGURE 3.5 obtenue lors de la vérification avec CPN tools, on constate que le nombre de noeuds dans SCC Graph est inférieur au nombre de noeud dans le réseau, ce qui signifie la **répétitivité des séquences**.

La FIGURE 3.6 quant à elle montre que le système ne termine jamais, car il y a une exécution infinie, aucun deadmarking (marquage terminal) ce qui montre la présence de cycle. Il y'a **absence de blocage** car chaque nœud du graphe d'accessibilité a au moins un arc sortant. Le réseau est **vivant** et, par conséquent, n'a pas de transitions mortes. Chaque marquage accessible est un homemarking (état d'accueil), et donc le réseau est **réversible** donc **réinitialisable**. Comme conclusion de cette analyse on peut dire que le modèle est validé car il vérifie les propriétés nécessaire (vivacité, bornitude, réversibilité, blocage).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons amélioré le protocole EERP qui est un protocole de routage efficace en consommation d'énergie, en lui intégrant quelque paramètre de QoS. Cette amélioration a donné naissance à un nouveau protocole appelé EERP-QoS, qui permet de minimiser la consommation d'énergie et de garantir une certaine QoS. Ainsi, nous avons modélisé le protocole proposé EERP-QoS avec les RdP. Les résultats obtenus, à partir du rapport d'analyse, en utilisant le CPN tools, ont montré que le modèle de RdP développé est borné, vivant et réversible.

Nous estimons comparer notre protocole EERP-QoS avec le protocole EERP, présenté dans ce chapitre. Mais en raison de la limite de temps, nous n'avons pas pu atteindre ce point.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans les RCSFs, la petite taille des nœuds capteurs impose des limites sur leurs capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie car ils sont généralement alimentés par des batteries à capacités limitées. Recharger les batteries dans un RCSF est parfois impossible en raison de l'emplacement des nœuds, mais le plus souvent pour la simple raison que cette opération est pratiquement irréalisable. Il est, donc, couramment admis que la limitation énergétique est une question incontournable dans la conception des réseaux de capteurs en raison des contraintes strictes qu'elle impose sur son exploitation.

Un autre paramètre très important dans les RCSFs est la qualité de service (QoS). Dans les approches de la qualité de service existantes, l'idée est d'agir sur l'un (ou plusieurs) des facteurs suivants : la latence, la délivrance de données fiables, le routage de bout en bout, la conformité avec les contraintes temps réel, etc. Dans les RCSFs, on pourra garantir le critère de la QoS en évitant certains problèmes, comme le débordement des mémoires tampon, les transmissions perturbées, etc.

Dans ce mémoire, nous avons proposé l'amélioration des systèmes de communication des RCSFs pour assurer une meilleure gestion d'énergie ainsi qu'une bonne qualité de service. Notre objectif a été axé sur l'étude et l'analyse de ce problème (l'optimisation de consommation d'énergie et la garantie de certains paramètres de QoS). Pour se faire,

nous avons présenté, dans un premier lieu, les différentes généralités sur les RCSFs, afin de comprendre le contexte de notre travail. Par la suite, nous avons résumé, certains travaux de recherche menés dans l'axe de routage avec QoS dans les RCSFs. Enfin, nous avons amélioré le protocole EERP (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks) en proposant un nouveau protocole EERP-QoS (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks with Quality of Service.) qui se base sur la même stratégie de EERP pour minimiser la consommation d'énergie et qui garantit un certains paramètres de QoS, à savoir : le délai de transmission, la perte des paquets, la gigue et la fiabilité de transmission. L'évaluation de performances de stratégie du routage de notre protocole EERP-QoS a été faite par l'utilisation des RdP (Réseaux de Pétri). Le rapport d'analyse obtenu avec CPN (Colored Petri Net) tools a permis de montrer que le modèle de RdP développé est borné, vivant et réversible.

En guise de perspective, nous souhaitons évaluer les performances de EERP-QoS par simulation, en le comparant avec le protocole EERP et d'autres travaux dans le même contexte. C'est à dire des protocoles de routage avec QoS dans les RCSFs.

- [1] ABDELHAKIM.H, Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de magister Option Informatique Industrielle Institut National de formation en Informatique (I.N.I) Oued-smar Alger, 2007.
- [2] ABDERRAHMEN.B, BRUNO.S, Claude.D et LAURENT.A, Les bases de données dans les réseauxde capteurs sans fil, journal Techniques et sciences informatiques. 33. 739-776. 10.3166/tsi.33.739-776, December 2014.
- [3] AMARI.R et ACHARCHOUR.L, Conception et Réalisation d'un Simulateur de Routage avec QoS pour les Réseaux WBAN, Mémoir de master en Informatique Université de Bejaia, 2015.
- [4] ANOUAR.D, Contributions à l'amélioration des performances des Réseaux de Capteurs sans fil à base d'IR-UWB, Thèse de Doctorat en Informatique et Télécommunications Université Mohamed V Rabat, 2015.
- [5] ATMANI.M et OUARET.S, Amélioration du protocole de routage Gossiping dans les réseaux de capteurs , Mémoir de master en Informatique Université de Bejaia, 2008.
- [6] BENARAB.A, Le routage multi chemins avec QoS dans les réseaux de capteurs sans fil , Mémoir de master en Informatique Université de Bejaia, 2013.
- [7] BENCHAIRA.D et BENCHEIKH.A, Sécurité de la dissémination de données dans un réseau de capteurs sans fils : cas du protocole Tiny Diffusion, memoire d'ingénieur'état en informatique option systèmes d'informatiques école national supérieur d'informatique (I.N.I) Oued-smar Alger, 2009.

- [8] BOUBICHE.D, Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fils, mémoire de magistère en informatique Option Informatique industrielle Université de l'Hadj Lakhdar-Batna, 2008.
- [9] BOUKHARI.N, Auto-localisation dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de Master Informatique Spécialité Réseaux, Université Mohamed Boudiaf - MSILA, 2016.
- [10] BOULFEKHAR.S, Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs, Mémoire de Magistère Université de Bejaia, 2006.
- [11] BOURIDAH.N et SIOUANI.A, Routage hiérarchique multi-sauts dans les réseaux de capteurs sans fil à basse consommation d'énergie, Mémoire de Master Informatique Option Réseaux et Systèmes Distribués Université de Béjaia, 2016.
- [12] BOUSBA.N, La Qualité de Service dans les protocoles à basse consommation d'énergie dans les RSCFs, These en vue de l'obtention de doctorat en réseaux et systèmes distribués Université de Bejaia, 2019.
- [13] BOUSSOUFA.F et BOUAOUINA.R, Cross layer avec contrainte de temps pour un réseau de capteur sans fil, Mémoir de master en Informatique Université de Bejaia ,2012.
- [14] BOUZIDA.S et NADI.A, Le routage hiérarchique à basse consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoir de master en Informatique Université de Bejaia , 2013.
- [15] DEEPA.O et SUGUNA.J, An optimized QoS-based clustering with multipath routing protocol for Wireless Sensor Networks ,Journal of King Saud University Computer and Information Sciences,2017.
- [16] DHIB.E, Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs, Rapport de projet de fin d'études en Télécommunications Ecole supérieure des communications de tunis, 2007.
- [17] DILIP.K et TARUNPREEE.K, AntMQoS : An Ant-based Multi-Constrained QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science Vol I WCECS, October 25-27, San Francisco, USA 2017.

- [18] DJELLAS.H et SADI.F, Le routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil, mémoire de Master en informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués Université A/Mira de Béjaïa, 2013.
- [19] GUETTAF.D et HADJAL.L, Amélioration et simulation du protocole de routage AORP dans les réseaux de capteurs sans fil Master en Informatique option Administration et sécurité des réseaux informatiques Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa, 2016.
- [20] HAFIR.L et SLIMANI.R, Etude et évaluation des performances des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil Master en Informatique option Administration et sécurité des réseaux informatiques Université Abderrahmane MIRA de Béjaïa, 2016.
- [21] HASSAM.L et LAHLOUH.N, Proposition d'un protocole distribué pour la répartition logique d'un réseau de capteurs sans fil pour un routage multisauts, Mémoire de master en informatique Option Administration et Sécurité des Réseaux, Université A.Mira de Bejaïa, 2016.
- [22] HELAILI.N et MEKHNACHE.S, Simulation du Routage dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils, Mémoire de Master en Informatique option Administration et Sécurité des Réseaux Université A/Mira de Bejaïa, 2017.
- [23] ITOUA.E, Réalisation d'une plate-forme pour l'optimisation de réseaux de capteurs sans fil, Thèse pour l'obtention de grade de docteur en informatique de l'Université de Limoges, 2018.
- [24] JOSE E, Modélisation Multi-contraintes d'un Système de Production Flexible, Thèse Spécialité Informatique INSA de Rouen, 2016.
- [25] KANDOUCI.A BELABBAS.A, GénérationEt Distribution De Clés Dans LesRéseaux De Capteurs CorporelsSans Fil (WBAN's), Mémoire de Master En Informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2017.
- [26] KHALID.E, La gestion de la qualité de service temps-réel dans les réseaux de capteurs sans fil, thèse en informatique, Université Chouaib Doukkali - EL Jadida, 2014.

- [27] LOUALIA.S et RACHDI.N, La diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil avec économie d'énergie, Mémoire de master en informatique spécialité Réseaux et systèmes distribués, Université A/Mira de Béjaïa, 2013.
- [28] LYES.K et NADJIB.B, Les réseaux de capteurs état de l'art, Rapport de recherche université USTHB, 2014.
- [29] MESSAI.M, Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil, Mémoire de Master En Informatique Option : Réseaux et Systèmes Distribués Université A/Mira de Béjaïa, 2008.
- [30] MUHAMMAD.A, SHAFIULLAH.K, RASHID.A, MUHAMMAD.S and DHANAN-JAY.S, Quality of Service of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks : A Review, 2017.
- [31] MUHAMMED.A , SHAFI.U.K , RASHID.A , and SOHAIL.M, Quality of Service of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks : A Review, 2017.
- [32] SAYAD.M , Energy Efficient Protocol (EEP) : un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique , Ecole nationale Supérieure d'Informatique (ESI)Oued-Smar, Alger, 2009.
- [33] SEBAHI.Y et YESSAD.N, Routage avec Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc, Mémoire de Fin de Cycle En vue de l'obtention du diplôme de Master recherche en Informatique spécialité réseaux et systèmes distribués Université de Bejaia, 2013.
- [34] SELVI.M, VELVIZHY.P, GANAPATHY.S, H. KHANNA.N et KANNAN.A, A rule based delay constrained energy efficient routing technique for wireless sensor networks survey, 2017.
- [35] SUMATHI.R and SRINIVAS.M.G, A Survey of QoS Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks, J Inf Process Syst, Vol.8, No.4, 2012.
- [36] YACINE.C, Réseaux de Capteurs Sans Fils, support de cours Version 1, 2016.
- [37] YASER.Y, Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil, Thèse de Doctorat Spécialité informatique université de haute Alsace, 2010.

-
- [38] ZHIGANG.J, YINGYYING.M, YISHAN.S, SHUO.L, and XIAOMEI.F, A Q-Learning-Based Delay-Aware Routing Algorithm to Extend the Lifetime of Underwater Sensor Networks, *Journal Sensors (Basel)*, 2017.
- [39] [http : //ijarcsse.com/index.php/ijarcsse/article/view/86/66](http://ijarcsse.com/index.php/ijarcsse/article/view/86/66).
- [40] [http : //www.nicolasjean.com/pdf/essairoutage](http://www.nicolasjean.com/pdf/essairoutage).
- [41] [https : //fr.wikipedia.org/wiki/Rseau_de_capteurs_sans_fil](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rseau_de_capteurs_sans_fil).
- [42] [https : //fr.wikipedia.org/wiki/Routage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Routage).
- [43] [https : //moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF1.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF1.html)].
- [44] [https : //www.memoireonline.com/02/12/5433/m_at-de-lart-sur-les-reseaux-de-capteurs-sans-fil13.html](https://www.memoireonline.com/02/12/5433/m_at-de-lart-sur-les-reseaux-de-capteurs-sans-fil13.html).
- [45] [https : //f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM04/RM04c03.html](https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM04/RM04c03.html).
- [46] [https : //www.academia.edu/11436521/PRINCIPE_de_FUNCTIONNEMENT_DUGPS](https://www.academia.edu/11436521/PRINCIPE_de_FUNCTIONNEMENT_DUGPS).
- [47] [https : //fr.wikipedia.org/wiki/Dpassement_de_tampon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dpassement_de_tampon).
- [48] [https : //whatis.techtarget.com/fr/definition/Bande-passante](https://whatis.techtarget.com/fr/definition/Bande-passante).
- [49] Meddas.L et Meziani.S, Evaluation des performances d'un noeud dans un réseau Ad hoc via les réseaux de Petri, Mémoire de master en Modélisation Mathématique et Evaluation des Performances Réseaux, Université de Bejaia, 2018.

Résumé

Un des défis majeurs que pose l'utilisation des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) est le problème de la garantie de la qualité de service (QoS) et de l'optimisation de la consommation d'énergie. Dans ce mémoire nous avons développé un nouveau protocole de routage, baptisé EERP-QoS (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks with Quality of Service), permettant de minimiser la consommation d'énergie et de garantir une certaine QoS. Ce protocole est une variante du protocole EERP (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks) qui assure une efficacité énergétique pendant le routage des données. L'amélioration de EERP se situe en la diminution de la congestion en prenant en considération la taille du buffer, mais aussi en intégrant le SNR (Signal Noise Ratio) afin de garantir une qualité de transmission. Pour évaluer les performances de notre protocole EERP-QoS, nous avons modélisé sa stratégie de routage par les RdP (Réseaux de pétri). Le rapport d'analyse obtenu avec CPN (colored Petri Net) tools a permis de montrer que notre modèle de RdP est borné, vivant et réversible.

Mots clés : RCSF, QoS, routage, EERP, RdP

One of the major challenges in the use of Wireless Sensor Networks (WSNs) is the problem of ensuring quality of service (QoS) and optimizing energy consumption. In this paper we developed a new routing protocol, called EERP-QoS (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks with Quality of Service), to minimize energy consumption and ensure a some QoS. This protocol is a variant of the EERP (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks) protocol that provides energy efficiency during data routing. The improvement of EERP is in reducing congestion by taking into consideration the size of the buffer, but also by integrating SNR (Signal Noise Ratio) to guarantee transmission quality. To evaluate the performances of our EERP-QoS protocol, we modelled its routing strategy using CPN (Petri Networks). The analysis report obtained with CPN (colored Petri Net) tools showed that our MOP model is bounded, living and reversible

Key words : WSN, QoS, routing, EERP, PN.

Résumé

Un des défis majeurs que pose l'utilisation des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) est le problème de la garantie de la qualité de service (QoS) et de l'optimisation de la consommation d'énergie. Dans ce mémoire nous avons développé un nouveau protocole de routage, baptisé EERP-QoS (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks with Quality of Service), permettant de minimiser la consommation d'énergie et de garantir une certaine QoS. Ce protocole est une variante du protocole EERP (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks) qui assure une efficacité énergétique pendant le routage des données. L'amélioration de EERP se situe en la diminution de la congestion en prenant en considération la taille du buffer, mais aussi en intégrant le SNR (Signal Noise Ratio) afin de garantir une qualité de transmission. Pour évaluer les performances de notre protocole EERP-QoS, nous avons modélisé sa stratégie de routage par les RdP (Réseaux de pétri). Le rapport d'analyse obtenu avec CPN (colored Petri Net) tools a permis de montrer que notre modèle de RdP est borné, vivant et réversible.

Mots clés : RCSF, QoS, routage, EERP, RdP

One of the major challenges in the use of Wireless Sensor Networks (WSNs) is the problem of ensuring quality of service (QoS) and optimizing energy consumption. In this paper we developed a new routing protocol, called EERP-QoS (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks with Quality of Service), to minimize energy consumption and ensure a some QoS. This protocol is a variant of the EERP (Energy-Efficient Routing Protocol for wireless sensor networks) protocol that provides energy efficiency during data routing. The improvement of EERP is in reducing congestion by taking into consideration the size of the buffer, but also by integrating SNR (Signal Noise Ratio) to guarantee transmission quality. To evaluate the performances of our EERP-QoS protocol, we modelled its routing strategy using CPN (Petri Networks). The analysis report obtained with CPN (colored Petri Net) tools showed that our MOP model is bounded, living and reversible

Key words : WSN, QoS, routing, EERP, PN.
