

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



Université de Batna 2
Faculté de Mathématiques et
d'Informatique
Département d'Informatique



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en Informatique

**Vers une approche cross layer pour le support de la QoS dans
les Réseaux de capteurs sans fil**

Présentée Par

Bourmada Amal

Soutenue le: 04/07/ 2017

Membres du jury:

<i>Président:</i>	Seghir Rachid	Maître de Conférences -A-	Université de Batna 2
<i>Rapporteur:</i>	Bilami Azeddine	Professeur	Université de Batna 2
<i>Examineurs:</i>	Benmohammed Mohamed	Professeur	Université de Constantine 2
	Chikhi Salim	Professeur	Université de Constantine 2
	Boubiche Djaleddine	Maître de Conférences -A-	Université de Batna 2

Remerciements

Avant tout, un grand merci à Dieu qui m'a donné la force et la vie pour accomplir cette tâche.

J'adresse mes premiers remerciements à Pr. Bilami Azeddine, mon directeur de thèse pour son encouragement, sa disponibilité, ses idées, ses conseils qui m'ont permis de mener à bien cette thèse. Je le remercie de m'avoir accordé le temps nécessaire pour s'entretenir avec moi et m'orienter vers le bon chemin dans la recherche et surtout pour l'atmosphère de sérénité qu'il a su m'octroyer.

J'exprime ensuite ma plus profonde gratitude à Docteur Seghir Rachid qui a bien voulu présider le jury. Je tiens à remercier également Professeur Benmohammed Mohamed, Professeur Chikhi Salim et Docteur Boubiche Djalaeddine d'avoir examiné la thèse. J'ai beaucoup apprécié leur acceptation de faire partie du jury de cette thèse.

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche LaSTIC (Laboratoire des Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication) de l'université de Batna 2 dirigé Par Pr. Bilami azeddine. Je tiens donc à le remercier ainsi que l'équipe de recherche qu'il dirige qui m'a soutenue dans la réalisation de ce travail.

Je ne saurais oublier de remercier Dr. Bouam Souheila pour l'accueil, l'aide, la sympathie sa disponibilité et son soutien dans les démarches administratives.

J'aimerais témoigner de toute ma gratitude à ma mère et à mes sœurs pour leur amour inconditionnel et leur soutien si précieux durant ces dernières années, sans oublier d'exprimer toute mon amitié à mon amie Radhia pour avoir toujours été présente.

Je ne pourrai oublier mes amies Yasmine et Houda avec qui j'ai partagé les durs et les meilleurs moments durant tout l'accomplissement de la thèse.

Enfin,, j'adresse mes chaleureux remerciements à toute personne pour toute contribution de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Résumé

Pour le monde de la recherche, la Qualité de service (QoS) dans les réseaux sans fil en général représente un défi majeur. Au vu de la panoplie des applications des RCSF, la garantie de la QoS, exigée par certaines applications, spécialement celles qui nécessitent un transfert de données multimédia en temps réel, comme la surveillance de malades, le contrôle de zones critiques (militaires), est devenue primordiale. La plupart des solutions développées pour les réseaux filaires et même celles préconisées pour les réseaux sans fil ad hoc ne sont pas directement applicables dans ce cas. Ceci est en raison de la nature des réseaux de capteurs qui sont sensiblement différents des MANETs. La plupart des travaux qui traitent le problème de la QoS dans les RCSF se basent sur des approches mono couche traditionnelles, qui opèrent donc au niveau d'une seule couche du modèle OSI. Dans ce travail nous avons exploré les bénéfices de l'approche Cross-layer afin de remédier aux limitations des protocoles mono couche tout en consacrant nos efforts sur l'optimisation conjointe des trois couches: Physique, MAC et Routage. Dans cette thèse nous proposons deux solutions pour assurer la QoS dans les RCSF. La première solution consiste en un nouveau protocole avec différenciation de service basé sur une extension du protocole de routage HEEP pour fournir une qualité de service à différents trafics, et ce en distinguant entre les différents flux qui seront servis en fonction de leurs priorités. Quant à la deuxième solution proposée, elle présente un protocole avec qualité de service et à faible consommation d'énergie basé sur une architecture Cross-layer.

Les évaluations par simulation des solutions proposées montrent un bon niveau de performances en termes de QoS, tout en assurant un faible niveau de consommation d'énergie.

Mots clés: RCSF, QoS, HEEP, économie d'énergie, cross-layer.

ملخص

في عالم البحوث، تعتبر جودة الخدمة (QoS) تحديا كبيرا في الشبكات اللاسلكية بشكل عام. نظرا لاستخدام شبكات الاستشعار اللاسلكية في عدة مجالات، ضمان جودة الخدمة المطلوبة لدى بعض تطبيقات (ش.إل)، وخصوصا تلك التي تتطلب نقل بيانات الوسائط المتعددة في الوقت الحقيقي، مثل مراقبة المرضى، والسيطرة على المناطق الحرجة (العسكرية) أمر ضروري في هذه الحالة. معظم الحلول التي قدمت للشبكات اللاسلكية وحتى تلك التي اقترحت في مجال الشبكات اللاسلكية هي غير قابلة للتطبيق مباشرة في هذه الحالة. ويرجع ذلك إلى طبيعة شبكات الاستشعار التي تختلف كثيرا عن شبكات (MANETs). معظم الاعمال التي تعالج مشكلة جودة الخدمة في (ش.إل) هي احادية الطبقة حيث توفر حلول لطبقة واحدة من طبقات الموديل OSI. في هذا العمل قمنا باستكشاف فوائد النهج المتعدد الطبقات لمعالجة نقائص بروتوكولات الطبقة الواحدة مع تكريس جهودنا من اجل التحسين المشترك لكل من الطبقة المادية، طبقة MAC وطبقة التوجيه. في هذه الأطروحة قمنا باقتراح حلين لضمان جودة الخدمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، الحل الأول هو بروتوكول جديد يركز على تميز الخدمة و يعتبر امتدادا لبروتوكول التوجيه HEEP من اجل توفير خدمات عالية الجودة و هذا عن طريق التمييز بين التدفقات المختلفة وفقا لأولوياتها. بالنسبة للحل الثاني المقترح فيتمثل في بروتوكولا ذو خدمات عالية الجودة و استهلاك ضئيل للطاقة مبني على خاصية التواصل بين الطبقات.

تقييم الحلول المقترحة عن طريق المحاكاة يظهر مستوى جيد من حيث جودة الخدمة، مع ضمان مستويات منخفضة من استهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، جودة الخدمة، كفاءة الطاقة، خاصية التواصل بين الطبقات.

Abstract

Quality of service (QoS) in wireless networks is a major challenge for researchers in this domain. In view of usage of wireless sensors networks (WSNs) in wide range of applications, and in order to ensure QoS for applications, especially those requiring real-time multimedia data transfer, such as patient monitoring, critical control (military), the purpose is becoming primordial. Most of the solutions developed for wired networks and even those recommended for ad hoc wireless networks are not directly applicable in this case. This is due to the nature of the sensor network which is substantially different from the MANETs. Most of works dealing with the QoS problem in WSNs are based on traditional layered approaches that operate on a single layer of the OSI model. Contrarily, we suggest in this work a cross-layer approach to overcome the limitations of the layered protocols. With this aim, we explored the benefits of the cross-layer approach while devoting our efforts to the optimization of the operation using different mechanisms at three layers: Physical, MAC and Routing layers.

In fact, this thesis proposes two solutions to ensure the QoS in WSNs. The first solution consists on an improvement of HEEP protocol. More precisely, this is an extension given to the protocol in order to support differentiated services for WSNs by providing requested quality of service for high priority real time traffic which is distinguished from the low priority and non-real time traffic. Thus, input traffic streams are served based on their priorities. The second proposed solution introduces a cross layer architecture protocol with quality of service and low energy consumption.

Simulation results show a good level of performances in terms of QoS, while ensuring a low level of energy consumption.

Key words: WSN, QoS, HEEP, Energy Efficiency, Approach Cross-layer.

Liste de publications

- Bourmada Amal and Bilami Azeddine. **Cross-Layer Energy Efficient Protocol for QoS Provisioning in Wireless Sensor Network.** *International Journal of Systems, Control and Communications (IJSCC)*, Inderscience. (In press). <http://www.inderscience.com/info/ingeneral/forthcoming.php?jcode=ijscc>.
- Bourmada Amal and Bilami Azeddine. **Hybrid Energy Efficient Protocol with Service Differentiation for QoS Provisions in Multi-Hop WSNs.** *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*, 6(2): 27-47, (2015).
- Djebaili Yasmine, Bourmada Amal and Bilami Azeddine. **A Hierarchical Fault Tolerant Routing Protocol for WSNs.** *International Conference on Networking and Advances Systems, Annaba (ICNAS'15), 2015.*
- Bourmada Amal, Djebaili Yasmine and Bilami Azeddine. **An Energy aware Routing Protocol with Differentiated Services for WSNs.** *International Conference in Complex Systems (CISC'14), 2014.*
- Bourmada Amal, Bilami Azeddine and Djebaili Yasmine. **Protocole avec Différentiation de Service pour une QoS dans les RCSF,** 1st JDITIC Batna, 2014.
- Bourmada Amal and Bilami Azeddine. **Diff- HEEP: Hybrid Energy Efficiency Protocol with differentiated services for Wireless Sensor Network,** 4th JDI, Guelma, 2014.
- Djebaili Yasmin, Bilami Azeddine and Bourmada Amal. **Protocole de Routage pour l'Economie d'Energie et la Tolérance aux Pannes dans les RSCF,** 1st JDITIC Batna, 2014.

Table des matières

Remerciements

Résumé	I
Liste de publications	IV
Table des matières	V
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
Liste des algorithmes	XI
Glossaire des acronymes	XII
Introduction générale	XIV

Chapitre 1: Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1	Introduction	1
1.2	Définition	1
1.3	Anatomie d'un nœud capteur	2
1.4	Différences entre les réseaux de capteurs sans fil et les MANETs	3
1.5	Critères à prendre en compte dans les réseaux de capteurs sans fil	4
1.6	Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil	5
1.6.1	Applications militaires	6
1.6.2	Applications à la surveillance	6
1.6.3	Applications médicales	6
1.6.4	Applications environnementales	7
1.6.5	Applications de traçabilité et de localisation	7
1.6.6	Applications domestiques	7
1.7	La communication dans les réseaux de capteurs	7
1.8	Familles de réseaux de capteurs sans fil	10
1.9	Conclusion	13

Chapitre 2: La Qualité de service dans les Réseaux filaires et sans fil

2.1	Introduction	14
2.2	Aperçu sur la qualité de service (QoS)	14
2.2.1	Paramètres de Qualité de Service	15
2.2.2	Les Classes de Services	16
2.3	La Qualité de Service dans les Réseaux Filaires	16

2.3.1	L'approche IntServ / RSVP	16
2.3.2	L'approche DiffServ	18
2.3.3	Modèle IntServ associé au modèle DiffServ	20
2.3.4	L'ingénierie de Trafic (MPLS-TE)	20
2.3.5	COPS	21
2.3.6	NSIS	22
2.4	La Qualité de Service dans les Réseaux Sans Fil (ad hoc)	23
2.4.1	Protocole de réservation de ressources (<i>INSIGNIA</i>)	23
2.4.2	Modèles de QoS pour les réseaux ad hoc	25
2.4.3	Le routage avec qualité de service dans les réseaux ad hoc	29
2.5	Conclusion	31

Chapitre 3: La Qualité de Service dans les réseaux de Capteurs Sans fil

3.1	Introduction	32
3.2	La qualité de service dans les réseaux de capteurs sans fil	32
3.2.1	Les perspectives de la qualité de service	33
3.2.2	Problématique de la QoS dans les réseaux de capteurs sans fil	34
3.2.3	Métriques et paramètres de qualité de service	35
3.3	Protocoles avec gestion de la qualité de service pour les RCSF	36
3.3.1	La couche réseau.....	36
3.3.2	La couche transport.....	39
3.3.3	La couche MAC	41
3.4	Conclusion	56

Chapitre 4: Architecture Cross-Layer

4.1	Introduction	58
4.2	Concept Cross-Layer	58
4.3	Importance de l'approche inter-couches (Cross-Layer) dans les RCSF	59
4.4	Les Types d'architecture Cross-Layer	59
4.4.1	Architecture Cross-layer à base de communication directe.....	60
4.4.2	Architecture Cross-layer à base de communication indirecte	60
4.4.3	Architecture Cross-layer à base de nouvelles abstractions.....	61
4.5	Protocoles Cross-layer avec QoS pour les RCSF	62
4.5.1	Le protocole QUATTRO	62
4.5.2	Le protocole CL-MAC	67
4.5.3	Autres protocoles Cross-layer avec QoS pour les RCSF.....	68
4.6	Conclusion	69

Chapitre 5: Protocole avec différenciation de service pour une QoS pour les RCSF

5.1	Introduction	70
-----	--------------------	----

5.2	Concept de base du protocole HEEP	70
5.2.1	Les grandes étapes du protocole HEEP	71
5.3	Mécanisme de différenciation de service pour les RCSF	74
5.4	Protocole QoS-HEEP	75
5.4.1	Mécanisme de rétrocontrôle pour l'agrégation de données	75
5.4.2	Modèle de différenciation de service	78
5.5	Evaluation des performances du protocole QoS-HEEP	83
5.5.1	Présentation du simulateur NS-2	83
5.5.2	Avantages et limites de la simulation	84
5.5.3	Environnement de simulation	84
5.5.4	Résultats de la simulation	86
5.6	Conclusion	91

Chapitre 6: Le protocole de communication Cross-layer proposé

6.1	Introduction	93
6.2	Le protocole CLEEP-QoS	93
6.2.1	Architecture Cross-layer	93
6.2.2	La couche physique : Evaluation de la qualité du lien radio	95
6.2.3	Qualité de Service au niveau de la couche MAC	96
6.2.4	Qualité de service au niveau de la couche réseau	98
6.3	Évaluation des performances du protocole CLEEP-QoS	101
6.3.1	Métriques de performance.....	101
6.3.2	Résultats	101
6.4	Conclusion	106

Conclusion générale **107**

Références

Table des figures

1.1	Réseau de capteurs sans fil.	1
1.2	Exemple d'un nœud capteur.	2
1.3	Architecture d'un Nœud capteur.	3
1.4	Exemple des applications des réseaux de capteurs sans fil.	8
1.5	Pile protocolaire adoptées pour les réseaux de capteurs sans fil.	8
1.6	Familles de réseaux de capteurs sans fil.	10
2.1	Architecture DiffServ.	19
2.2	Qualités requises pour des applications sous DiffServ.	20
2.3	L'architecture du protocole INSIGNIA.	24
2.4	Les types de nœuds du modèle FQMM.	26
2.5	Le modèle FQMM.	27
2.6	Le modèle SWAN.	28
2.7	Le modèle iMAQ.	28
3.1	Fonctionnement du protocole S-MAC.	45
3.2	Méthode d'accès au canal CSMA.	48
3.3	La différenciation de service dans PSIFT.	49
3.4	Classification des protocoles MAC avec gestion de la QoS.	56
4.1	Architecture Cross-layer à base de communication directe.	60
4.2	Architecture Cross-layer à base de communication indirecte.	61
4.3	Architecture à base de nouvelles abstractions.	61
4.4	Format du message de découverte de la route.	63
4.5	Format des messages WPRB et WRSP.	64
4.6	Format du message de réservation.	64
4.7	La phase de réservation.	65
4.8	La phase de collecte des informations sur les interférences des clusters.	66
4.9	Modèle de fonctionnement du protocole CL-MAC.	67
5.1	Organisation des nœuds dans le réseau.	71
5.2	Les étapes d'exécution du protocole HEEP.	72
5.3	Un réseau de capteur sans fil avec différentes classes du trafic.	78
5.4	Classification du trafic et modèle de file d'attente.	79
5.5	Modèle d'expérimentation.	85
5.6	Le délai de bout en bout de chaque classe de trafic.	86
5.7	Le débit de chaque classe de trafic.	87

5.8	Comparaison du délai de bout-en-bout.	87
5.9	Nombre de messages reçus par la station de base.	88
5.10	Nombre de messages (temps réel) reçus par la station de base. Comparaison entre HEEP et QoS-HEEP.	89
5.11	Taux de perte de paquets.	89
5.12	Délai de bout-en-bout versus le taux de paquets temps réel (Comparaison avec SPEED, DARA MMSPEED, HEEP).	90
5.13	Dissipation d'énergie par rapport à la durée de vie du réseau.	91
5.14	Latence versus nombre de nœud capteur.	91
6.1	Architecture Cross-layer.	94
6.2	L'interaction entre les trois couches.	94
6.3	Classification de trafic au niveau de chaque Nœud.	97
6.4	Répartition de Slots TDMA.	98
6.5	Les nœuds voisins du nœud N_i	99
6.6	Délai d'attente de chaque classe de trafic.	102
6.7	Utilisation des files d'attentes.	102
6.8	Débits mesurés en fonction du temps.	103
6.9	Comparaison des délais dans le cas de CLEEP-QoS et HEEP.	104
6.10	Comparaison des délais dans le cas de CLEEP-QoS et HEEP.	104
6.11	Le taux de paquets de haute priorité reçus (PRR).	104
6.12	Délai du trafic (HP) priorité versus le taux de paquets.	105
6.13	Energie consommée par paquet.	106

Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques des protocoles de la couche transport.	40
3.2	Comparaison des protocoles MAC avec gestion de QoS.	55
5.1	L'Energie consommé dans chaque étape.	82
5.2	L'énergie consommée par le protocole QoS-HEEP/nombre de nœuds vivants.	83
5.3	Paramètres de simulation.	85

Liste des Algorithmes

1. Le temps de service du paquet.	81
2. Algorithme de Routage.	100

Glossaire des acronymes

- **ACK** Acquittement
- **AF** Assured Forwarding
- **AIFS** Arbitration Interframe Space
- **BE** Best Effort
- **BS** Base Station
- **CAN** Convertisseur Analogique/Numérique
- **CCITT** Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique
- **CH** Cluster Head
- **CoS** Class of Services
- **CRC** Cyclic Redundancy Code
- **CSMA** Carrier Sense Multiple Access
- **CW** Contention Window
- **DiffServ** Differentiated Services
- **EF** Expedited Forwarding
- **FEC** Forward Error Correction
- **GPS** Global Positioning System
- **HEEP** Hybrid Energy Efficiency Protocol
- **IETF** Internet Engineering Task Force
- **IntServ** Integrated Services
- **ISO** International Standardisation Organization
- **LEACH** Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
- **LLC** Logical Link Control
- **LQE** Link Quality Estimator
- **MAC** Medium Access Control
- **MANETs** Mobile ad hoc networks
- **MEMS** MicroElectroMechanical Systems
- **MTTR** Mean Time To Repair
- **OSI** Open Systems Interconnexion

- **PEGASIS** Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
- **QoS** Quality of Service
- **RCSF** Réseaux de capteur sans fil
- **RSVP** Ressource reSerVation setup Protocol
- **RT** Real Time
- **RTCP** Real-time Control Protocol
- **RTP** Real-time Transport Protocol
- **TCP** Transmission Control Protocol
- **TDMA** Time division multiple access
- **UDP** User Datagram Protocol
- **VoD** Video on demand
- **WSNs** Wireless Sensor Networks

Introduction générale

L'utilisation des capteurs (sondes) dans divers domaines d'applications n'est pas une idée nouvelle. Cependant, les anciennes installations des capteurs étaient entièrement câblées. Cela pose plusieurs problèmes techniques comme l'inflexibilité, le coût élevé d'installation, la difficulté d'utilisation sur les appareils mobiles ou rotatifs, la difficulté du passage à l'échelle, etc. Ainsi, la technologie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) a été proposée comme une solution alternative aux capteurs câblés dans l'optique de profiter de ses avantages, notamment l'aspect sans fil. Néanmoins, les RCSF héritent aussi tous les problèmes de la communication sans fil, notamment ceux liés à l'accès au médium, comme la faible fiabilité de la communication sans fil, le problème du terminal caché et du terminal exposé.

Malgré sa ressemblance avec les autres réseaux sans fil, notamment les réseaux ad-hoc, les RCSF se distinguent par un ensemble de contraintes spécifiques. À titre d'exemple, les contraintes intrinsèques des nœuds capteurs se manifestent dans la pénurie des ressources d'énergie, la capacité limitée des mémoires et la faible puissance de calcul. Ces contraintes contribuent à augmenter la complexité de ces systèmes.

La qualité de service (QoS) est l'un des concepts les plus importants dans les réseaux modernes. Elle est, de plus en plus, exigée à cause de l'intégration de plusieurs services ayant des besoins différents dans le même réseau. Dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds utilisent généralement une application unique. Néanmoins, les trafics en provenance des différents nœuds peuvent avoir des priorités différentes. Cette diversité de trafics dans le réseau nécessite, d'une part, un traitement différencié selon les besoins spécifiques de chaque type de trafic et d'autre part, la satisfaction des besoins des applications (p. ex. le délai). Dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil, la problématique devient encore plus complexe à cause des contraintes intrinsèques des nœuds. La limitation des ressources (mémoire, processeur, énergie), la communication sans fil peu fiable, la densité importante et la nature distribuée des nœuds représentent les principaux enjeux pour le développement de tout protocole de communication. Bien évidemment, à cause de ces contraintes, la garantie de la QoS dans un réseau de capteurs sans fil pose des problèmes de recherche non triviaux. Ainsi, il est difficile d'appliquer directement les techniques utilisées dans les réseaux les plus proches au niveau de leurs architectures et mode de communication sans fil : les réseaux ad-hoc. Tous les mécanismes et protocoles

doivent être adaptés et simplifiés pour qu'ils soient compatibles avec les contraintes de ressources d'un RCSF.

Nous considérons que l'approche Cross-layer (inter couches) est l'une des solutions les plus prometteuses en termes de qualité de service et d'économie d'énergie. Cette approche consiste à concevoir des protocoles à base d'architecture Cross-layer, faisant interagir plusieurs couches de la pile protocolaire. En se basant sur ce principe, on peut développer des protocoles Cross-layer qui traitent le problème de qualité de service au niveau de différentes couches, tout en respectant les caractéristiques des RCSF. Dans cette thèse, nous avons proposé, deux nouveaux protocoles de communication, le premier consiste en un nouveau protocole avec différenciation de service basé sur une extension du protocole de routage HEEP pour fournir une qualité de service aux différents types de trafics, et ce en distinguant entre les différents flux qui seront servis en fonction de leurs priorités, le deuxième consiste en un protocole Cross-layer qui se base sur l'interaction des trois couches adjacentes réseau, liaison et physique afin de garantir de la QoS dans le Réseau de Capteurs.

Le mémoire de thèse est organisé en six chapitres étalés sur deux parties, la première partie constituée de quatre chapitres présente le contexte de notre travail, alors que la seconde partie expose nos contributions. La première partie est structurée en quatre chapitres: le premier chapitre est un état de l'art sur la technologie des réseaux de capteurs sans fil. Ce chapitre présente des généralités sur ce domaine de recherche en pleine évolution. Le chapitre deux aborde la problématique de qualité de service dans les réseaux filaires et dans les réseaux sans fil. Le troisième chapitre met le point sur la qualité de service dans les RCSF. En fin le concept d'architecture Cross-layer est présenté dans le chapitre quatre. La deuxième partie de notre travail est divisée en deux chapitres, dont le cinquième chapitre qui consiste à présenter la première contribution qui est un nouveau protocole avec qualité de service basé sur le mécanisme de différenciation de service pour les RCSF ainsi qu'une étude détaillée de ses performances par simulation, le sixième chapitre détaille la deuxième contribution qui consiste à présenter notre protocole Cross-layer appelé CLEEP-QoS. Enfin, la conclusion générale récapitulera les travaux de cette thèse et permettra d'introduire les perspectives.

Partie 1 : Introduction au domaine de recherche

Chapitre 1

Généralités sur les Réseaux de capteurs Sans fil

1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont apparus ces dernière décennies bénéficiant des progrès électroniques de miniaturisation et de la maîtrise des communications sans-fil qui ont permis de faire chuter de façon considérable les coûts de fabrication. De nombreux systèmes nécessitent de prendre en compte l'environnement pour mesurer les phénomènes physiques afin de prendre les décisions nécessaires. Le savoir acquis dans les technologies des Microsystèmes électromécaniques (MEMS), des communications sans fil et de l'électronique numérique a permis la conception et le développement de nœuds capteurs de petites taille, communiquant d'une manière sans fil et ayant un faible coût de fabrication et une faible consommation d'énergie. D'autre part, les techniques de réseaux mobiles permettent d'affranchir des fils et donc de déployer facilement des réseaux de capteurs dans les endroits même difficiles à y accéder. De plus, dans la vie courante, l'utilisation des capteurs sans fil est en demande croissante pour la supervision et la sécurité.

1.2 Définition

Les réseaux de capteurs sans fil (*RCSF* ou *WSNs* : *Wireless Sensor Networks*) sont un type spécial de réseau Ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des capteurs. Ils se composent généralement d'un nombre potentiellement grand de capteurs déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt appelée champ de captage et communicants entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif [1]. Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations pour construire une vue globale de la zone surveillée, qui est rendue accessible à l'utilisateur externe par un ou plusieurs nœud (s). Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via un chemin multi-sauts formé d'autres capteurs à un « point de collecte », appelé station de base (ou SINK). Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite [2].

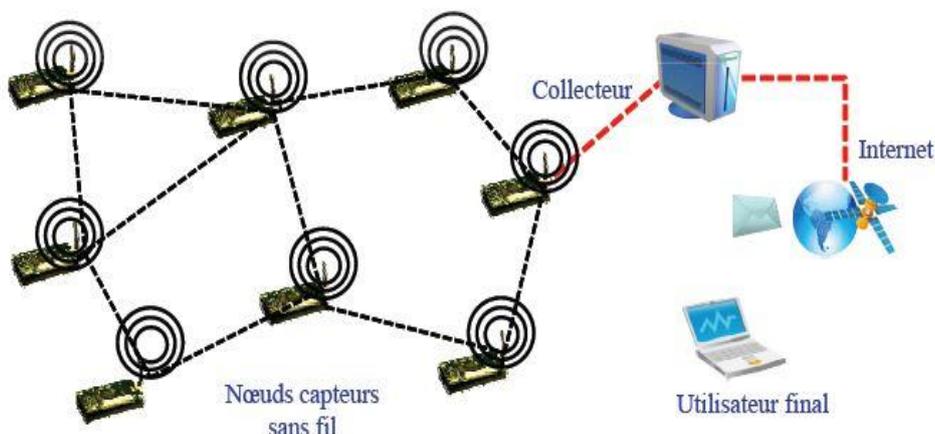


Figure 1.1 Réseau de capteurs sans fil.

1.3 Anatomie d'un nœud capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base (appelée aussi le nœud puits ou Sink) [1].



Figure 1.2 Exemple d'un nœud capteur.

Un nœud capteur est constitué de quatre unités essentielles à son fonctionnement: une unité d'acquisition (de captage), une unité de traitement, unité de transmission et unité de contrôle d'énergie (Batterie) [3].

- **L'unité d'acquisition** : l'unité d'acquisition est composée d'un ou plusieurs capteurs qui vont obtenir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique (CAN) qui va convertir l'information relevée et la transmettre à l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement** : elle est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission.
- **L'unité de transmission** : l'unité de transmission est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.
- **L'unité de contrôle d'énergie** : Comme il est souhaitable de s'affranchir de toute connexion par câble, le capteur doit disposer de sa propre source d'énergie qui alimente le reste des unités. Cette unité se trouve généralement sous la forme de batterie standard de basse tension.

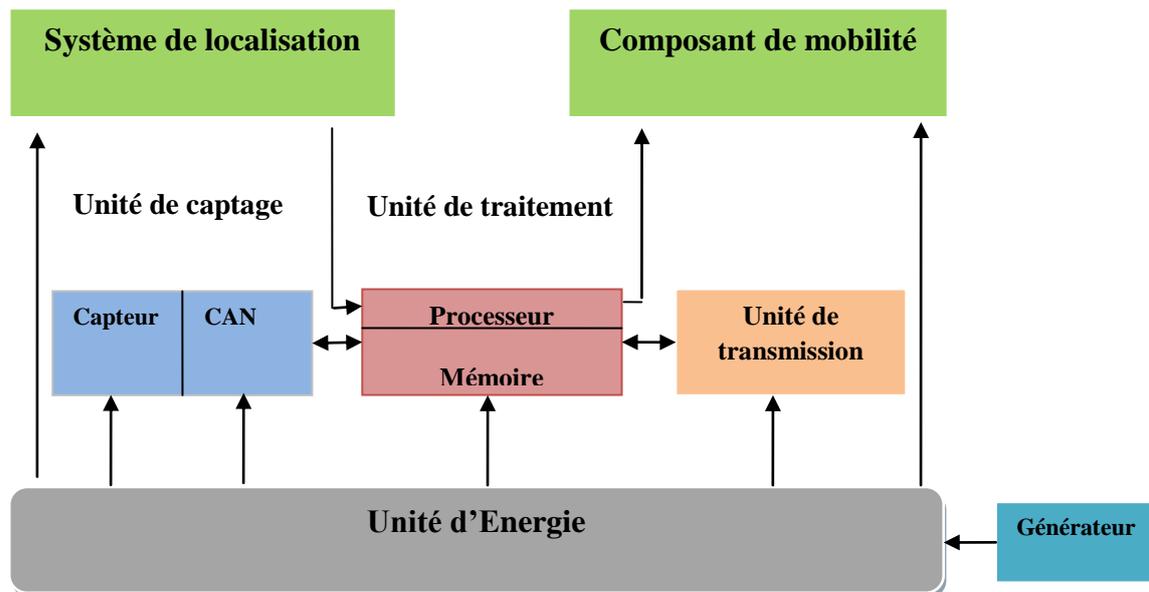


Figure 1.3 Architecture d'un Nœud capteur.

D'autres composants peuvent être ajoutés à un nœud capteur, comme un système de localisation (GPS), un composant de mobilité pour le rendre mobile, un générateur d'énergie, etc.

1.4 Différences entre les réseaux de capteurs sans fil et les MANETs

La réalisation des réseaux de capteurs dédiés aux différentes applications, exigent des techniques et des protocoles qui prennent en compte les spécificités et les exigences de ces réseaux, vu que les techniques conçues pour les réseaux ad hoc traditionnels, ne sont pas bien adaptées aux réseaux de capteurs. Pour illustrer ce point, les différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc sont décrites ci-dessous [4]:

- Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés en grand nombre.
- Les réseaux de capteurs sont non fiables: en tout moment, les capteurs peuvent être défaillants ou inhibés.
- La topologie des réseaux de capteurs change très fréquemment.
- Les réseaux de capteurs utilisent principalement le paradigme de communication broadcast tandis que les réseaux ad hoc sont basés sur le paradigme de communication point à point.
- Les capteurs sont limités en énergie, capacités de calcul, et mémoire, les MANETs sont rechargeable et plus puissants.
- Les capteurs peuvent ne pas avoir un identifiant global à cause du grand nombre de nœuds.

1.5 Critères à prendre en compte dans les réseaux de capteurs sans fil

Les nœuds capteurs ayant un petit volume qui approchera les quelques millimètres cube dans un proche avenir, sont limités dans la quantité d'énergie qu'ils peuvent stocker. En outre, ces nœuds sont sensibles à l'échec, suite à l'épuisement des batteries ou bien aux influences de l'environnement. Dans cette section, nous allons montrer Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs [5], [6]:

- **Les contraintes matérielles :** La principale contrainte matérielle est la taille du capteur qui doit être réduite. Les autres contraintes sont que la consommation d'énergie doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible.
- **La consommation d'énergie:** Les RCSF ont une contrainte importante d'énergie: la batterie des capteurs est généralement limitée pour préserver leur faible coût et leur taille réduite. Elle est également difficilement renouvelable de par la nature de certaines applications des RCSF qui nécessitent un déploiement aléatoire des capteurs, à grande échelle et dans des zones difficiles d'accès. Ces derniers peuvent en effet être propulsés en grand nombre dans une zone à surveiller, et doivent donc pouvoir s'auto-organiser pour communiquer. Il est donc primordial que les batteries durent le plus longtemps possible. De ce fait, la conservation de l'énergie est cruciale dans un RCSF d'autant plus que le fonctionnement de tout le réseau en dépend. En effet, tout le réseau pourrait devenir non opérationnel si trop de nœuds sont perdus à cause de la dissipation complète de leur énergie, car ceci peut engendrer des pertes de communication dues à de trop grandes distances entre les capteurs.
- **La topologie de réseau :** Les réseaux de capteurs sont caractérisés par leur topologie dynamique. La moindre défaillance énergétique d'un capteur peut donc changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier. La perturbation des communications (comme les obstacles, les interférences, etc.) peut induire des cassures des liens entre les nœuds voisins. Le redéploiement et l'ajout d'autres nœuds peuvent être envisagés pour pallier quelques défaillances. Dans tous les cas, le réseau de capteurs doit pouvoir se réorganiser rapidement avec un coût énergétique réduit.
- **La grande échelle:** les nœuds capteurs sont déployés en grand nombre qui peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions et nécessite beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.
- **Les coûts de production :** Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Un nœud capteur ne doit pas coûter chère.

- **L'environnement:** Les capteurs sont souvent déployés d'une manière aléatoire dans des endroits isolés tels que des zones de guerre, des forêts, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- **La tolérance aux fautes:** Dans un réseau de capteur certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause de l'épuisement de leurs batteries, d'un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance de fautes. La tolérance de fautes est la capacité de maintenir l'activité du réseau même si une erreur est intervenue sur un ou plusieurs nœuds capteurs (batterie, panne, conditions physiques, etc.).
- **L'agrégation des données:** les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de petits nœuds capteurs ce qui engendre la diffusion de grandes quantités de données sur le réseau, en plus quelques événements peuvent être détectés par un ou plusieurs capteurs ce qui conduit à une redondance de données inutile. Des mécanismes d'agrégation de données peuvent diminuer les transmissions et les redondances afin de préserver la ressource énergétique.
- **La sécurité:** Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité, et d'intégrité doivent être mis en place au sein du réseau. Les algorithmes de cryptographie conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte des ressources limitées de ces derniers. De plus, l'absence d'une protection physique des nœuds capteurs ainsi que la nature des liens sans fil, rend le réseau vulnérable aux attaques malveillantes.
- **La qualité de service:** La qualité de service (QoS) représente un défi majeur dans les réseaux sans fil en général. Actuellement, l'intérêt de la QoS est plus porté vers les réseaux MANETs que pour les réseaux de capteurs. Cependant, au vu de la panoplie des applications des RCSF, la garantie de la QoS, exigée dans certaines applications dans les RCSF, spécialement celles qui nécessitent un transfert de données multimédia en temps réel, comme la surveillance de malades, le contrôle de zones critiques (militaires), est dans ce cas primordiale. Ce qui rend, la QoS dans les RCSF un sujet de recherche attrayant et très actif.

1.6 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs peuvent être programmés à un grand nombre de fins dans des domaines différents, Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter le militaire, la santé, l'environnemental, et les

maisons intelligentes, l'industriel, médical, climatique,...etc, qui sont détaillées dans cette section [7], [8].

1.6.1 Applications militaires

Le faible coût, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine.

Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes. Par exemple, les RCSF, peuvent être déployés sur un endroit stratégique ou difficile d'accès afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (par la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations, par exemple).

1.6.2 Applications à la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains tout en garantissant des résultats plus fiables.

- L'intégration des capteurs dans des bâtiments aidera à la détection des fissures et les altérations dans leur structure suite à un séisme ou au vieillissement.
- Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système de détection d'intrusions distribué. L'aspect distribué rend plus complexe la possibilité de mettre hors d'usage ce système de surveillance.
- Parmi les autres applications de sécurité, on peut citer la surveillance de voies ferrées, pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains, ou la détection de fuites d'eau dans les barrages afin d'éviter les dégâts éventuels.

1.6.3 Applications médicales

La surveillance permanente des malades et la collecte des informations physiologiques de meilleure qualité peut être effectuée avec des micros capteurs afin de faciliter le diagnostic de maladies. Les capteurs peuvent être implantés dans le corps humain pour contrôler les problèmes médicaux comme le cancer et pour aider les patients à maintenir leur santé. En outre, en implantant sous la peau des mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie. La création d'une rétine artificielle composée d'une centaine de micro-capteurs pour corriger la vue.

Un autre exemple d'application médicale présenté dans [9]. Les auteurs présentent un système en temps réel pour suivre les patients. Ce système intègre des capteurs de signes vitaux, la position des capteurs, et un réseau ad-hoc pour permettre la surveillance à distance du patient. Cela facilitera la communication entre les pompiers sur scène (en cas de catastrophe), et les spécialistes dans les hôpitaux locaux qui seront disponibles pour la consultation à distance.

1.6.4 Applications environnementales

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

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

1.6.5 Applications de traçabilité et de localisation

Suite à une avalanche il est nécessaire de localiser les victimes enterrées sous la neige en équipant les personnes susceptibles de se trouver dans des zones à risque par des capteurs. Ainsi, les équipes de sauvetage peuvent localiser plus facilement les victimes. Les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans des endroits clos comme les mines par exemple.

1.6.6 Applications domestiques

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

1.7 La communication dans les réseaux de capteur sans fil

1.7.1 Pile protocolaire

Contrairement aux réseaux ad hoc traditionnels, les réseaux de capteurs exigent des nouvelles limitations pour la conception des protocoles de communication. Le modèle OSI (Open Systems Interconnexion) de l'ISO (International Standardisation Organization) ne suffit donc plus [8].



Figure 1.4 Exemple des applications des réseaux de capteurs sans fil.

La pile protocolaire utilisée par le nœud puits ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure 1.5. Cette pile comprend cinq couches (la couche application, transport, réseau, liaison de données, physique) qui ont les mêmes fonctions du modèle OSI, ainsi que trois plans qui sont : le plan de gestion d'énergie, de gestion de tâches et le plan de gestion de mobilité.

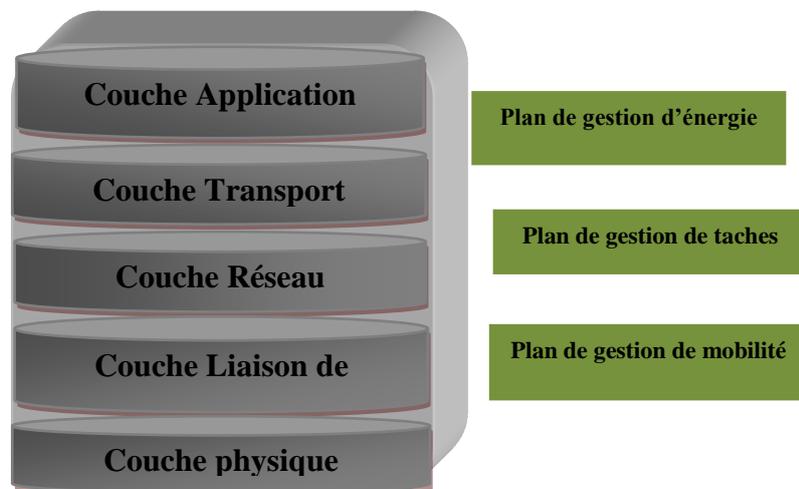


Figure 1.5 Pile protocolaire adoptée pour les réseaux de capteurs sans fil.

La couche physique : Cette couche doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste. Elle est responsable de la détection du signal et la sélection des fréquences porteuses.

La couche liaison de données : Cette couche est responsable du multiplexage des flux de données, de la détection des erreurs et de l'accès sur le media. Elle est composée de la couche de contrôle de liaison logique (LLC pour Logical Link Control) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau, et la couche de contrôle d'accès au medium (MAC pour Medium Access Control) qui contrôle la radio. Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les nœuds voisins.

La couche réseau : Le rôle de cette couche est de trouver des routes efficaces pour transmettre les données captées vers la station de base tout en optimisant l'énergie des nœuds capteurs.

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

La 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.

Le plan de gestion de l'énergie : Les nœuds d'un réseau de capteurs sont caractérisés par la limitation de leurs batteries. Le plan de gestion de l'énergie consiste à gérer l'énergie consommée par les capteurs, par exemple un capteur doit se mettre en sommeil dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de captage.

Le plan de gestion de mobilité : Ce plan est responsable de la détection et l'enregistrement de tous les mouvements des nœuds capteurs dans le cas où ils sont mobiles afin de les aider à se localiser.

Le plan de gestion des tâches : Le niveau de gestion des tâches permet de répartir d'une façon équitable les tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

1.8 Familles de réseaux de capteurs sans fil

En survolant les différentes références sur les RCSF [10], [7] en passant par l'incontournable référence du domaine [11], ainsi que les différentes applications proposées, les RCSF peuvent être catégorisés en plusieurs familles. La figure 1.6 représente les différentes familles des RCSF.

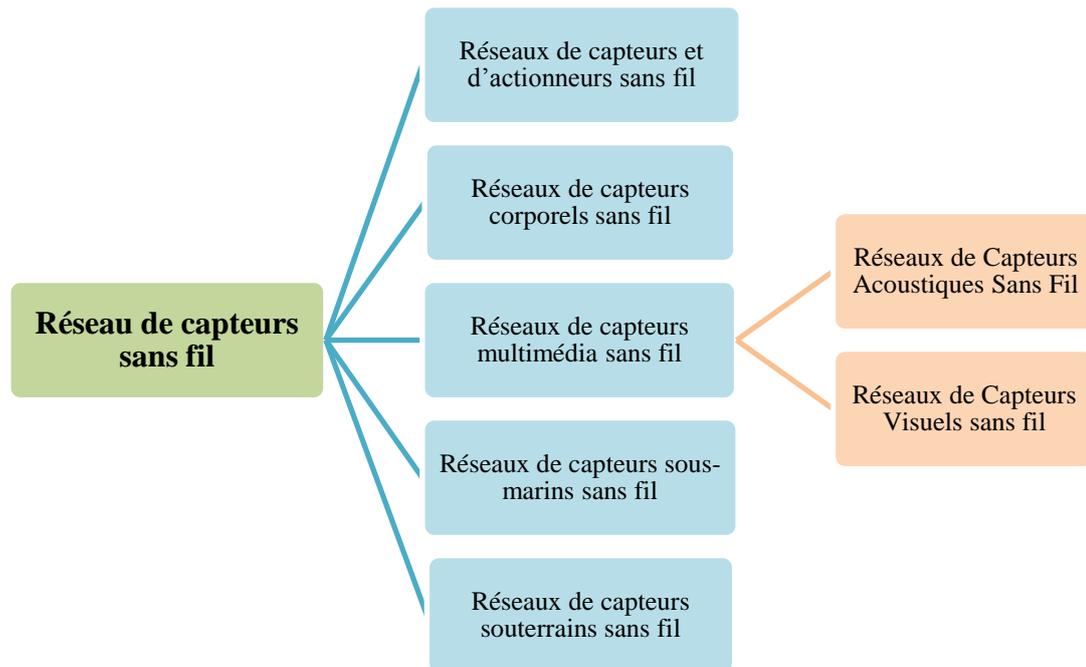


Figure 1.6 Familles de réseaux de capteurs sans fil.

1.8.1 Réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil

Les RCSF fournissent des informations détaillées du monde physique grâce à des solutions de détection distribuées. En général, cette information est traitée au niveau du Sink. Avec l'émergence d'actionneurs et de robots à faible coût, l'information recueillie à partir de l'environnement peut être utilisée pour déclencher une action sur cet environnement. Cela a conduit à l'émergence des Réseaux de Capteurs et d'Actionneurs Sans Fil (RCASF) qui sont capables d'observer le monde physique, traiter localement quelques données pour la prise de décisions sur la base de ces observations, et effectuer des actions appropriées [11].

Un exemple important d'applications utilisant les RCASF est la détection d'incendie. Nous pouvons imaginer des capteurs répartis capables de détecter l'origine et l'intensité du feu, puis de relayer cette information aux gicleurs d'eau (des actionneurs), afin de maîtriser l'incendie. De même, des capteurs détecteurs de mouvement et de lumière répartis dans une maison peuvent détecter la présence de personnes. Selon l'identité et l'emplacement de l'utilisateur,

les capteurs peuvent commander les actionneurs appropriés pour exécuter des actions, en fonction des préférences de l'individu que la maison peut apprendre au fil du temps.

1.8.2 Réseaux de capteurs sous-marins sans fil

Les Réseaux de Capteurs Sous-marins Sans Fil (RCSMSF) [10] sont envisagés pour permettre une grande variété d'applications telles que la collecte de données océanographiques, la surveillance de la pollution, l'exploration offshore, la prévention des catastrophes, la navigation assistée et la surveillance tactique. Plusieurs véhicules sans pilote ou sous-marins autonomes, équipés de capteurs sous-marins, peuvent être utilisés pour des applications d'exploration des ressources naturelles sous-marines et de collecte de données scientifiques, ou encore pour recueillir des données de surveillances stratégiques. Pour rendre ces applications viables, il est nécessaire de développer des schémas de communication adaptés à ces appareils sous-marins. Comme pour les exigences des réseaux de capteurs classiques, les nœuds sous-marins doivent posséder des capacités d'auto-configuration. Les RCSMSF peuvent contribuer à la surveillance de courants marins et les vents, l'amélioration des prévisions météo, la détection des changements climatiques, ainsi que la compréhension et la prévention de l'effet des activités humaines sur les écosystèmes marins. Les RCSMSF qui mesurent l'activité sismique à partir d'emplacements distants peuvent fournir des alertes aux tsunamis dans les zones côtières, ou étudier les effets des tremblements de terre sous-marins [12].

1.8.3 Réseaux de capteurs souterrains sans fil

Les Réseaux de Capteurs Sous-Terrain Sans Fil (RCSTSF) sont constitués de nœuds sans fil qui fonctionnent sous la surface du sol [13]. Ces dispositifs sont soit complètement enterrés sous un sol dense, ou placés dans un espace souterrain ouvert borné, comme les mines et les tunnels routiers/méto. Les RCSTSF promettent une grande variété de nouvelles applications. Par rapport aux réseaux de capteurs souterrains actuels, qui utilisent des méthodes de communication filaires pour le déploiement du réseau, les RCSTSF ont plusieurs mérites remarquables tels que la dissimulation, la facilité de déploiement, l'actualité des données, la fiabilité et la densité de la couverture. Dans les applications agricoles, des capteurs souterrains sont utilisés pour surveiller les conditions du sol en termes d'eau et de teneur en minéraux. Les capteurs sont également utilisés avec succès pour surveiller l'intégrité des infrastructures invisibles tels que la plomberie. Les glissements de terrain ainsi que les tremblements de terre sont suivis à l'aide de sismomètres enterrés. Une autre application possible est la surveillance de la qualité de l'air dans les mines de charbon souterraines. L'accumulation du méthane et de monoxyde de carbone est un problème dangereux qui peut conduire à des explosions et incendies dans la mine. La présence de ces gaz représente un grand danger aussi pour la santé

des mineurs et doit être suivie en permanence. Les capteurs peuvent également être utiles dans la surveillance de l'état des structures souterraines d'un bâtiment, d'un pont ou d'un barrage. Cela pourrait permettre un suivi en temps réel de l'usure dans un bâtiment et de prévenir des incidents catastrophiques [10].

1.8.4 Réseaux de capteurs corporels sans fil

Les Réseaux de Capteurs Corporels Sans Fil (RCCSF) sont une autre extension des RCSF qui, à leur tour, ont évolué au cours des dernières années en raison de l'innovation significative dans les micro-capteurs, le traitement embarqué, ainsi que les technologies sans fil [14]. Un RCCSF est constitué de plusieurs micro-nœuds interconnectés, de faible puissance, qui peuvent à l'intérieur du corps, sur le corps, ou près du corps, surveiller les patients et leur constantes, donner des traitements et communiquer les données aux centres de surveillances. Les RCCSF ont reçu un énorme intérêt de la part des industriels et les différents acteurs du secteur de la santé, en raison de l'étendu des applications envisageables et commercialisables dans ce secteur, telles la télémédecine, les soins de santé à distance, les sports et le divertissement. L'intérêt pour ces réseaux vient en majorité du fait que les systèmes de santé traditionnels n'ont pas été conçus pour répondre à l'énorme flux de patients et sont ainsi insuffisants dans les scénarios actuels. Les chercheurs parlent même d'arriver à un point où les individus n'auront même pas conscience du fait qu'ils étaient à un certain moment malades. Beaucoup de travaux de recherches ont porté sur les technologies de communications sans fil où le corps est le medium, nommées « communications On-Body » [15], et d'autres reliant le capteur corporel à un dispositif externe, caractérisées de « communications Off-Body » [16].

1.8.5 Réseaux de capteurs multimédia sans fil

Les progrès récents dans la technologie des CMOS ont permis le développement de modules de caméras qui pourront facilement être intégrés à des émetteurs-récepteurs bons marchés. En outre, les microphones ont longtemps été utilisés comme une partie intégrante de nœuds capteurs sans fil. L'interconnexion des sources multimédia avec des appareils de communication peu coûteux a favorisé la recherche dans la mise en réseau de capteurs multimédia [17]. En conséquence, les RCMSF sont devenus l'objet de recherches dans une grande variété de domaines. Le type du capteur utilisé détermine le type de données collectées ainsi que la catégorie du réseau. Quand seuls les microphones sont utilisés le réseau est nommé Réseaux de Capteurs Acoustiques Sans Fil (RCaCSF).

1.9 Conclusion

Ce chapitre introduit une vue d'ensemble sur les RCSF. En effet, dans un premier temps nous avons présenté les RCSF d'une manière générale en passant en revue les types de nœuds capteurs, les différentes architectures de réseaux ainsi que leurs caractéristiques particulières recueillies d'après plusieurs références bibliographiques. Deuxièmement, nous avons introduit les différentes familles des RCSF, à savoir les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil (RCASF), les réseaux de capteurs sous-marins sans fil (RCSMSF), les réseaux de capteurs souterrains sans fil (RCSTSF), les réseaux de capteurs corporels sans fil (RCCSF) ainsi que les réseaux de capteurs multimédia sans fil (RCMSF). Dans le chapitre 2, nous présentons les différents travaux de recherches proposés dans la littérature portant sur la qualité de service dans les RCSF.

Chapitre 2

La Qualité de service dans les Réseaux filaires et sans fil

2.1 Introduction

La qualité de service (Quality of Service - QoS) est un enjeu majeur dans le domaine des télécommunications. Aujourd'hui, plusieurs types d'applications qui utilisaient traditionnellement des réseaux dédiés transitent via Internet. Des applications aussi diversifiées que la voix, la vidéo temps réel, le courriel, l'échange de données, le web et les jeux en temps réel utilisent l'Internet comme support de communications. Récemment, l'introduction de l'informatique en nuages (Cloud Computing) va générer encore plus de trafic, de diversité de service et surtout de nouvelles contraintes. Toutes ces applications ont des exigences très différentes en termes de qualité de service. Le problème est que le protocole Internet n'a pas été conçu pour offrir plusieurs niveaux de qualité de service, ou encore un contrôle d'admission. En effet, tous les flux sont traités de la même manière, en essayant toutefois d'offrir le meilleur service possible. Pour pallier ce problème, plusieurs nouveaux concepts ont été introduits comme les mécanismes Intserv, DiffServ [18] et la différenciation de la fiabilité [19].

2.2 Aperçu sur la qualité de service (QoS)

Dans les réseaux de télécommunication, l'objectif de la qualité de service est d'atteindre un meilleur comportement de la communication, pour que le contenu de cette dernière soit correctement acheminé, et les ressources du réseau utilisées d'une façon optimale. La qualité de service appelée aussi QoS (Quality of Service) a été définie selon une recommandation du CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique) comme « l'effet général de la performance d'un service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur du service ». Elle peut aussi être définie comme la capacité d'un élément du réseau (exemple : routeur, nœud ou une application) de fournir un niveau de garantie pour un acheminement des données.

Selon [20], la qualité de service est affectée par plusieurs facteurs qui peuvent être répartis en deux catégories : le facteur humain comme à titre d'exemple, la stabilité du service, le délai et la disponibilité. Ces facteurs sont subjectifs, car ils sont liés à la satisfaction de l'utilisateur final qui peut être différente d'une personne à l'autre ou pour la même personne dans des situations variées. Les facteurs techniques, quant à eux, sont des facteurs mesurables et, par conséquent, permettent une évaluation objective et plus précise. Ces facteurs techniques peuvent être illustrés dans la fiabilité, l'extensibilité « Scalability », l'efficacité, etc.

2.2.1 Paramètres de Qualité de Service

La qualité de service est basée en général sur un certain nombre de paramètres, de natures différentes, dont les plus importants sont [21]:

- **Le délai de bout-en-bout (End-to-End Delay):** Le délai de communication est une métrique très importante, car la plupart des applications recommandent une communication rapide. Cependant, les exigences en termes de délai changent d'une application à l'autre, ou même entre les différents messages de la même application. On distingue deux types d'applications selon leur degré de tolérance au délai : (i) les applications tolérantes en délai, appelé SRT « Soft Real-Time », qui peuvent tolérer un délai maximal moyen et (ii) les applications qui ont des exigences strictes en termes de délai maximal (appelé HRT « Hard Real-Time »). Le délai provient généralement de deux sources principales. (i) Le retard d'accès au médium qui dépend fortement de la densité des nœuds RCSF, de la bande passante offerte par la couche physique et de la méthode d'accès au canal utilisée. Ce délai peut être maîtrisé dans le cas des méthodes d'accès déterministes. (ii) Le deuxième provient du temps de traitement des paquets à l'intérieur des nœuds intermédiaires (routeurs), plus particulièrement dans les files d'attente. Ce type de délai est généralement appelé latence. Il dépend plutôt de la charge du trafic, de la bande passante et des mécanismes d'ordonnancement et de gestion des files d'attente utilisées. D'autres sources de délai peuvent être négligeables comme, à titre d'exemple, le délai de propagation vu que la distance entre les nœuds est très limitée dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil.
- **Le débit :** Ce paramètre définit la quantité maximale de données qu'un lien peut transmettre pendant un intervalle de temps donné. Le réseau doit répondre à cette contrainte dans le cas du téléchargement d'une application volumineuse qui nécessite une assez large bande passante pour récupérer les fichiers de l'application le plus vite possible.
- **La fiabilité (le taux de perte de paquets):** Ce facteur indique le degré de tolérance du réseau aux erreurs de transmission qui peuvent se produire. Ce paramètre est utile pour les applications Web, transfert de fichier, chat et messagerie électronique.
- **la gigue (en anglais jitter):** est la variation du délai des paquets reçus au fil du temps. Cette gigue vient du fait que les conditions réseau ne sont pas toujours stables et peuvent varier d'un instant à l'autre. Ainsi, cette variation peut affecter la qualité de service dans certaines applications comme les applications interactives. Pour palier le problème de variation de délai, on utilise une mémoire tampon au niveau du récepteur afin d'ajuster le délai pour qu'il soit constant. Cependant, si la gigue d'un paquet est très large, ce dernier risque d'être supprimé. Lorsque le nombre de paquets supprimés

est important, cela engendra des problèmes de reconstitution des données, ce qui affectera la qualité de service (p. ex. détérioration de la qualité du son, de l'image ...).

D'après la définition de la qualité de service et de ses différentes métriques nous pouvons constater que les besoins en qualité de service diffèrent selon le type de l'application. Par exemple, pour les applications temps réel, comme la voix et la vidéo, le délai de bout en bout d'un paquet doit être limité, autrement le paquet est inutile. Les applications non temps réel, comme le transfert de fichier ou la messagerie, quant à elles se focalisent sur la fiabilité des communications.

2.2.2 Les Classes de Services

Class Of Service ou Classe de service. C'est une méthode de gestion de trafic dans un réseau, établie sur le principe du regroupement de type de trafic similaire (ex : email, voix, flux vidéo, flux vidéo, transfert de fichiers volumineux). Chaque type de trafic sera traité selon une classe définissant ses propres priorités de service. Contrairement à la QoS, ces technologies "CoS" ne garantissent pas de niveau de service pour la gestion de la bande passante et du délai de livraison. Elles fournissent, en quelque sorte, un fonctionnement minimal. Ainsi la technologie CoS est plus simple à gérer et plus adaptable à l'évolution structurelle d'un réseau et au volume d'informations traitées. Plusieurs modèles de CoS ont été standardisés et peuvent être utilisés indifféremment, dont le modèle de l'ITU-T Y.1541 [22] et de l'IETF RFC 4594 [23] sont les plus connus. Dans [24] et [25] une classification des principales applications a été faite.

2.3 La Qualité de Service dans les Réseaux Filaires

Si le service « au mieux » (best effort) offert par les réseaux IP semble suffisant pour les applications dites élastiques telles que le courrier électronique ou le transfert de fichiers, les applications multimédia ont, elles, besoin de garanties plus fortes. C'est dans cette optique que l'IETF a mis au point successivement les deux architectures IntServ et DiffServ.

2.3.1 L'approche IntServ / RSVP

Le modèle IntServ / RSVP est une solution du groupe de travail Integrated Services de l'IETF pour offrir une qualité de service adaptée aux besoins de l'application [26]. Il s'agit de permettre aux applications de réserver des ressources le long d'un chemin point-à-point ou multipoints. Les réservations peuvent se faire de façon statique (par ex. configuration manuelle) ou dynamique. Dans ce dernier cas, on devra utiliser le protocole de réservation de ressources RSVP. Dans cette optique, chaque routeur doit pouvoir classifier les paquets afin

de déterminer à quel flot ils appartiennent, ordonnancer ces paquets pour les transmettre en fonction des ressources disponibles, et effectuer un contrôle sur l'état des ressources avant d'accepter ou de refuser une demande de réservation.

IntServ définit deux types de services:

- **Guaranteed Service (GS)** qui garantit la bande passante et un délai d'acheminement limité.
- **Controlled Load** qui est équivalent à un service Best Effort dans un environnement non surchargé.

Le modèle IntServ utilise le protocole de signalisation RSVP (Resource reSerVation setup Protocol) [27] afin de mettre en place les réservations. RSVP est utilisé par une application pour demander au réseau d'assurer une certaine qualité de service pour un flot donné. Ce même protocole sera utilisé par les routeurs du réseau entre eux pour établir et maintenir les tables d'états liées au flot. RSVP comme IntServ identifie des flots unidirectionnels et est conçu pour supporter les échanges multicast aussi bien que unicast. La réservation de ressources est initialisée par le site destinataire du flot. L'émetteur du flot envoie régulièrement des messages de contrôle "path" vers le ou les destinataires. Chaque destinataire répond par un message "resv" dans lequel il indique les critères de la qualité de service qui lui convient. Les ressources nécessaires, si disponibles, sont réservées par les routeurs sur le chemin destinataire vers l'émetteur. Dans le cas d'un flot multicast, les différentes réservations concourantes sont agrégées. Dans le cas d'absence de message "path" pendant un certain temps, les ressources réservées sont libérées. Les messages "path" et "resv" sont transmis comme des datagrammes ordinaires en "best-effort".

Il est important de rafraîchir périodiquement les informations au cas où il y a eu changement de la route emprunté par le flot. En effet, il est inutile de continuer à réserver les ressources sur un routeur qui ne fait plus partie du chemin emprunté.

Difficultés

Le reproche principal à l'encontre du modèle IntServ est sa faible capacité à passer à l'échelle. En effet la gestion des ressources par flot nécessite le stockage et la maintenance de nombreux états dans chaque routeur. Si ce type de mécanisme n'est pas trop coûteux dans les réseaux de taille réduite tels que les réseaux locaux, il est impossible de l'appliquer dans des réseaux à grande échelle tels que l'Internet. En effet, le surcoût en traitement engendré dans les routeurs des réseaux d'interconnexion serait trop élevé et dégraderait les performances globales du réseau de façon significative.

2.3.2 L'approche DiffServ

Le modèle à différenciation de services [28] (Differentiated Services, DiffServ) résout le principal problème rencontré par IntServ, celui de la difficulté de la montée en puissance qui doit accompagner l'accroissement de la taille du réseau envisagé. L'intérêt d'un tel modèle est de pouvoir s'occuper du problème d'approvisionnement en qualité de service à travers une allocation de services basée sur un contrat établi entre un fournisseur de services et un client. Pour le groupe de travail DiffServ, un micro-flux de paquet IP perd son identité propre et circule sur Internet en tant que membre d'une classe de flux. L'approche de DiffServ permet donc à des fournisseurs d'offrir différents niveaux de services à certaines classes de flots de trafic rassemblés. Ainsi, il devient question de supporter un schéma de classification en attribuant des priorités à des agrégats de trafic. De ce fait, les paquets sont classés grâce à un mécanisme de marquage d'octets dans l'en-tête des paquets IP, et les services qui sont octroyés par les routeurs à ces paquets dépendent des classes alors définies. Ce marquage est effectué au niveau de l'étiquette de l'en-tête du paquet : le DSCP (DiffServ Code Point) qui se situe dans le champ DS de l'en-tête IP réservé à DiffServ [29].

Les fonctionnalités

La solution consiste à rejeter dans les routeurs situés aux frontières du réseau toutes les fonctions de classification de paquets (marquage, "policing" v vérification du respect du contrat par l'émetteur v) et de mise en forme de trafic, tandis que les routeurs du cœur du réseau n'auront qu'à appliquer des comportements prédéfinis (Per-Hop Behaviour) à des agrégats de flots marqués dans ce but par les routeurs de frontière. Dans le cœur du réseau, tous les paquets sont marqués, ces marques sont utilisées par des routeurs "DScapable" pour déterminer le comportement qui doit leur être appliqué. Les différents comportements interviennent dans la gestion des files d'attente et dans les algorithmes de sélection de paquets à rejeter en cas de congestion d'une file d'attente. Le choix à faire par le routeur du mode de comportement en fonction de la marque présente dans le paquet est très rapide puisqu'il n'y a plus qu'un seul champ à analyser dans l'en-tête du paquet. Le modèle DiffServ prévoit la notion de domaine DiffServ, ensemble de routeurs fonctionnant avec la même politique de services et les mêmes comportements par rapport aux agrégats de flots. Ces domaines comportent des routeurs frontières qui classifient les paquets et font une éventuelle mise en forme du trafic entrant, et des routeurs de cœur qui appliquent les comportements liés aux classes de service (Per-Hop Behaviour). La création et le maintien de tables d'états associés aux flots de données sont confinés aux routeurs frontières, moins chargés que les routeurs de cœur de réseau. Les paquets peuvent recevoir une marque "DiffServ" soit dans le routeur d'entrée du domaine DiffServ soit dans la station émettrice. Le champ utilisé pour le codage du marqueur est le champ ToS, "Type of Service" de IPv4 (nouvelle sémantique "DS field", champ DSCP) ou le champ "Traffic Class" de IPv6.

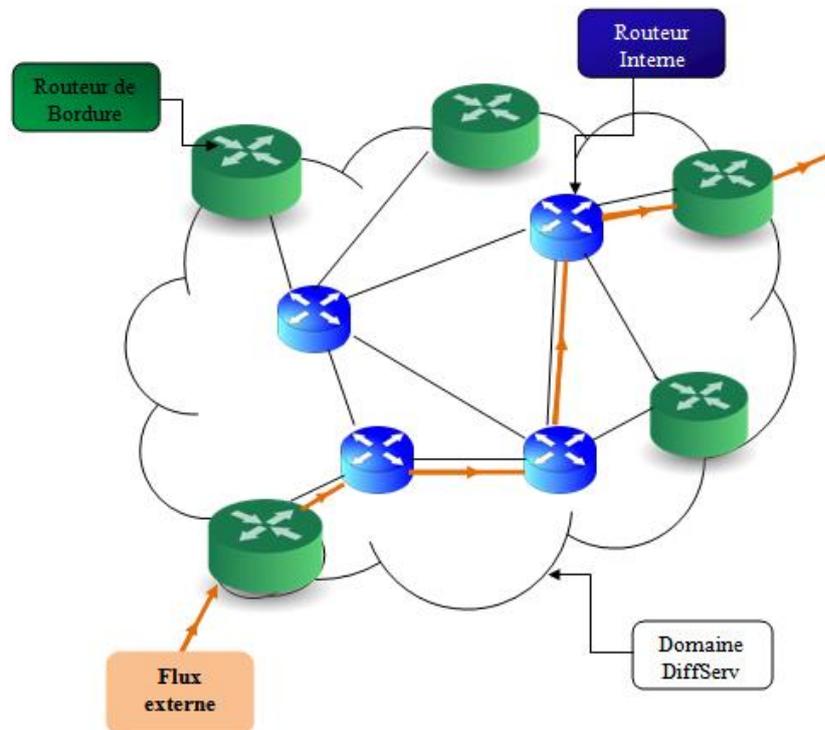


Figure 2.1 Architecture DiffServ

Classes de services de DiffServ

Les classes de service définies dans DiffServ sont les suivantes [29]:

- **Le service « Best-Effort » :** Le service Best-Effort (BE) c'est le service actuellement utilisé dans l'Internet et qui ne distingue pas les flots prioritaires des flots moins prioritaires.
- **Le service Assured Forwarding (AF):** cette classe est destinée aux applications sensibles à la perte des paquets. Dans cette classe, le réseau s'engage à ce que, dans la très grande majorité des cas, les paquets du flot qui se conforment au profil de trafic qui aura été négocié soient transmis dans les meilleures conditions. Le PerHop Behaviour est défini en conséquence. Les paquets de ce même flot qui ne respecteraient pas le profil négocié seront traités comme des paquets Best Effort [30].
- **Le service Expedited Forwarding (EF):** est un dérivé du service « premium » conçu pour servir des applications demandant de faibles pertes, un délai et une gigue très faibles et une garantie de bande-passante. les flots qui demandent la qualité Premium seront traités prioritairement par rapport à tous les autres paquets. Le service EF est un service à forte priorité, délivrant des garanties en matière de bande passante, et permettant des taux de perte, de délai et de gigue faibles [31].

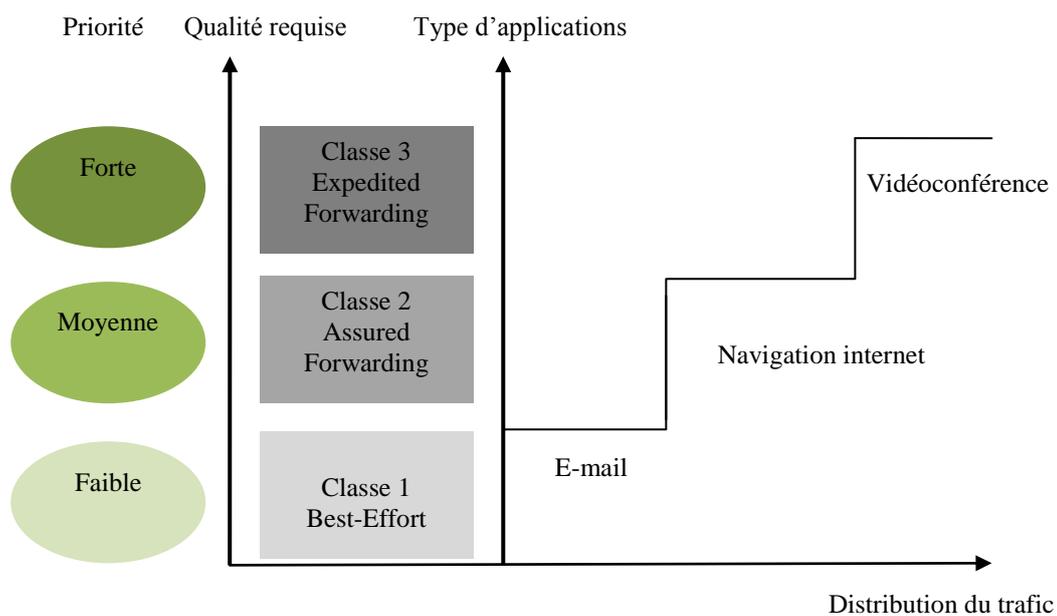


Figure 2.2 Qualités requises pour des applications sous DiffServ.

L'approche DiffServ consiste, quant à elle, à remédier aux problèmes de passage à l'échelle et de complexité de gestion. Néanmoins, cette politique présente l'inconvénient de garantir une différenciation absolue, c'est-à-dire que plus une classe est grande, plus elle sera privilégiée pour le partage des ressources par rapport aux autres classes concurrentes. Ces mécanismes engendrent une discrimination de répartition et par conséquent peut provoquer le phénomène de famine entre les classes.

2.3.3 Modèle IntServ associé au modèle DiffServ

En partant du principe que IntServ n'est applicable qu'en périphérie et que DiffServ convient bien pour la gestion des agrégats, l'idée consiste à associer les deux techniques afin de disposer d'une architecture globale de gestion de la QoS. Les routeurs du réseau cœur sont configurés avec des classes de services (file d'attente par priorité) pour lesquels une réservation logique de débit est effectuée par ingénierie de trafic. Les routeurs de périphérie recevant une requête RSVP réalisent alors une admission d'appel sur le débit logique associé avec la classe de service sollicitée par la requête de QoS. A nouveau, ce modèle ne fonctionne que si le réseau cœur est surdimensionné ou si une fonction de « Bandwidth Broker » est disponible [25].

L'intégration de ces deux mécanismes est à l'étude. Plusieurs propositions ont été soumises. La première solution consiste à ne mettre l'intégration de service que dans les sites terminaux. Le cœur du réseau ne traite pas les messages de signalisation mais les transmet comme des paquets normaux qui sont à nouveau interprétés dans le site destinataire. Un

contrôle d'admission en bordure du réseau Diffserv permet de déterminer si le flux peut entrer dans la classe de service. L'autre possibilité est de considérer le réseau DiffServ avec la classe EF comme élément de réseau et le caractériser pour permettre de construire un service garanti.

2.3.4 L'ingénierie de Trafic (MPLS-TE)

Le modèle Multi-Protocol Label Switching, MPLS [32] est conçu pour permettre la construction de très vastes réseaux IP composés de routeurs et commutateurs de paquets ou cellules. Le schéma général est similaire à celui de DiffServ, le but étant ici de router les paquets IP à plus grande vitesse. Le principe consiste à rejeter tout le traitement associé au routage des paquets dans les routeurs d'entrée du réseau MPLS et de marquer (par un Label) ces paquets de façon à ce que les routeurs et commutateurs du cœur de réseau n'aient plus qu'à considérer ce label pour retrouver la route à faire suivre au paquet dans une table adéquate dite de commutation (Forwarding Table). Ces tables sont constituées à priori dans tous les éléments du réseau, indépendamment d'un trafic potentiel, et maintenues au fil de l'évolution des tables de routage.

Ce modèle, actuellement accepté comme constituant le futur du cœur des grands réseaux IP, dont l'Internet, est très similaire à celui de DiffServ. Des travaux sont en cours pour évaluer la possibilité d'associer des éléments de qualité de service aux chemins préconstruits par MPLS de façon à ce que des paquets voyageant sur les mêmes routes IP, mais demandant des qualités de service différentes circulent sur des circuits MPLS affectés de qualités de service différentes tout en bénéficiant des hautes performances promises par MPLS.

Le groupe de travail MPLS, preuve que cette technique a les faveurs de la communauté scientifique, des industriels et des opérateurs. L'architecture MPLS est certainement l'une des plus abouties en matière de gestion de la QoS dans les réseaux IP. La signalisation MPLS permet au final de recréer un mode connecté par commutation de label au dessus de l'IP tout en gardant la souplesse du routage bond par bond. Le seul reproche qui peut lui être fait, est qu'elle n'est pas disponible pour toutes les infrastructures de transport comme les réseaux d'accès radio.

2.3.5 COPS

Le modèle COPS (Common Open Policy Specification) [33] est très simple; il nécessite deux composants distincts: un PEP (Policy Enforcement Point) et un PDP (Policy Decision Point) [34]. Le PEP contrôle et le PDP prend des décisions basées sur la politique des règles qui a été définie. Le PEP, qui réside dans un routeur, recevant une demande de QoS sous forme de signalisation RSVP sollicite le PDP afin de savoir quelle politique appliquer pour ce nouveau flux. Le PDP cherche dans sa base de données quelle est la politique de QoS la plus

appropriée à appliquer pour cette demande. Une fois la réponse reçue, le routeur applique la politique fournie par le PDP en configurant les ressources appropriées (classification, police, marquage et file d'attente). Le protocole RSVP est alors terminé dans le routeur et la réponse directement renvoyée à la source. La communication entre le PEP et le PDP est assurée par le protocole COPS du nom éponyme du groupe de travail. Les échanges sont en réalité basés sur la synchronisation de base de données. En effet, le groupe de travail a défini une base de données pour contenir les politiques de règles de QoS à appliquer : Policy Information Base – PIB [35]. Le PDP contient l'ensemble des PIB de tous les PEP qu'il gère. Chaque PEP ne conserve que sa vue locale au travers de sa PIB. En plus de ce mode. PULL un mode dit PUSH permettait de configurer un PEP depuis un PDP sans utiliser le protocole RSVP. COPS appartient à la famille des commandes de ressources centralisées et utilisables dans le processus d'invocation (mode PUSH et PULL) ou dans le processus de commande livraison (mode PUSH uniquement). A nouveau, seul le modèle de PIB pour DiffServ [36] a été standardisé, laissant aux opérateurs le soin de décider quelles sont les politiques à utiliser. Or, la garantie de la QoS dépend exclusivement des règles contenues dans les PIB. Ces politiques se sont révélées très complexes à déterminer pour être réellement adoptées. De ce fait, le protocole COPS n'a pas connu les faveurs de l'IETF et a été peu implémenté par les constructeurs d'équipements [25].

2.3.6 NSIS

RSVP étant malgré tout quelque peu utilisé, l'IETF a décidé de le rajeunir et surtout pallier aux problèmes inhérents du modèle IntServ Next Steps in Signaling – NSIS [37] pourrait n'être qu'un RSVP v2, mais le modèle en deux couches de signalisations le rend beaucoup plus puissant et flexible. En premier lieu, la couche de signalisation générique -General Internet Signaling Transport - GIST [38] assure l'acheminement des paquets de signalisation depuis une source jusqu'à une destination via un ensemble de routeurs. Contrairement à RSVP, tous les routeurs ne sont pas obligés de supporter le protocole. Comme RSVP, cette signalisation est On-Path dans le sens où elle suit le même chemin que les données même si tous les routeurs n'y participent pas. Au dessus de GIST, plusieurs signalisations dites applicatives - NSIS Signalling Layer Protocol - NSLP sont en cours de standardisation. NSIS est partie intégrante de la famille des signalisations distribuées et utilisable dans le processus d'invocation. De plus, le groupe de travail a défini comment utiliser NSIS dans le cadre d'un domaine DiffServ contrôlé par une fonction d'admission d'appel et de préemption du trafic [39]. Cette dernière permet de classer également NSIS dans la famille des signalisations centralisées [25]. Il restera en dernier recours à vérifier dans la pratique si NSIS est réellement applicable aux réseaux de grande taille ou s'il ne souffre pas des mêmes défauts que son ancêtre RSVP, ce qui semble être le cas au vu de sa complexité croissante.

2.4 La Qualité de Service dans les Réseaux Sans Fil (ad hoc)

L'IntServ et DiffServ ne représentent pas la solution parfaite en matière de QoS pour Internet et encore moins pour les réseaux Ad Hoc sans fil. Des modèles conçus pour les réseaux Ad Hoc sont apparus ces dernières années comme INSIGNIA [40], FQMM [41] et SWAN [42].

2.4.1 Protocole de réservation de ressources (*INSIGNIA*)

INSIGNIA [40] est un protocole de signalisation conçu pour l'intégration de la qualité de service dans les réseaux Ad hoc. Il permet d'établir une réservation de bande passante orientée flux dans le but de supporter des services temps réel adaptatifs. Il est basé sur un système de signalisation « *In-band* », où les informations de contrôle de la signalisation sont incluses dans l'entête des paquets de données (le champ option du paquet IP). Ceci permet de réduire l'overhead généré par les messages de signalisation, contrairement à une signalisation « *out-band* » explicite comme RSVP par exemple ce dernier utilise une granularité par flux pour des applications capables de modifier leur comportement en fonction de la bande passante disponible [43].

INSIGNIA n'est pas lié à un protocole de routage particulier. Il supporte deux types de services : temps réel et best effort. Il offre des algorithmes de réservation, de restauration et d'adaptation rapides pour répondre aux changements de topologie du réseau et aux dégradations des liens radios. La demande de réservation est effectuée lors de l'envoi du premier paquet de données, et est rafraîchie par le passage des paquets de données.

Afin de fournir des services temps réel adaptatifs, un modèle de gestion de flux a été proposé (*flow management model*), qui consiste en une architecture de contrôle au niveau IP, permettant d'adapter la session de l'utilisateur au service disponible sans signalisation explicite entre la source et la destination. Il comprend les fonctionnalités suivantes [43]:

- Signalisation in-band (INSIGNIA) se charge d'établir, de terminer de restaurer et d'adapter les réservations des flux.
- Le module *packet forwarding* classe les paquets entrants. Les messages de signalisation sont remis à INSIGNIA tandis que les paquets sont, soit passés aux couches supérieures, soit retransmis vers le destinataire.
- Le module *routing protocol* s'occupe de la mise à jour de la table de routage selon la topologie du réseau et la met à disposition des autres modules.

- Le contrôle d'admission alloue la bande passante aux flux en se basant sur les débits minimaux et maximaux spécifiés dans la requête mais aussi sur la capacité et l'utilisation du canal. Il décide entre l'acceptation ou le rejet d'un nouveau flux.
- Le module *packet scheduling* se charge de l'ordonnancement des paquets.
- Le module MAC contrôle l'accès au support en tenant compte de la QDS.

INSIGNIA possède néanmoins quelques lacunes :

- D'abord un problème de passage à l'échelle. En effet, INSIGNIA suivant le modèle *Intserv*, le problème du maintien de l'état des flux dans chaque nœud ne peut être évité.
- Ensuite, la gestion de la bande passante n'est pas optimale puisque la réservation effectuée avant un goulot d'étranglement est perdue. Ce gaspillage n'a lieu que pendant un temps limité puisque la source va rapidement être informée du problème mais ce problème existe bel et bien.
- Enfin, INSIGNIA ne propose que deux classes de service : RT ou BE, une granularité plus fine pourrait permettre plus de flexibilité pour les applications.

La figure 2.3 montre l'architecture du protocole INSIGNIA:

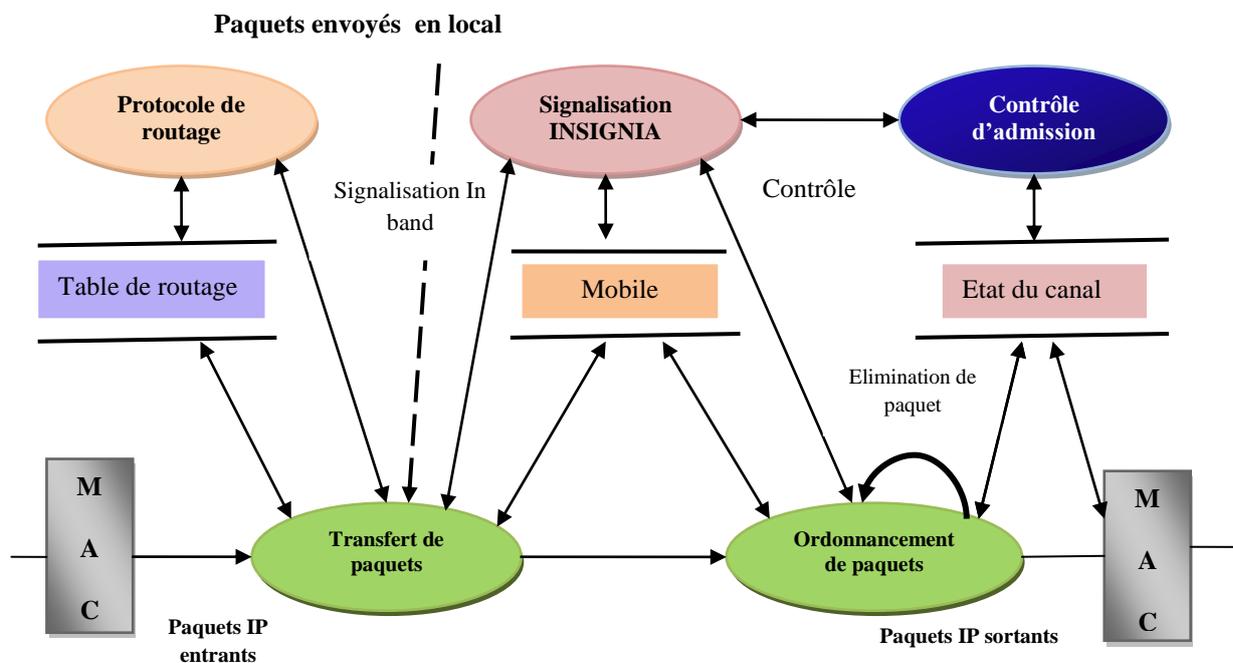


Figure 2.3 L'architecture du protocole INSIGNIA.

2.4.2 Modèles de QoS pour les réseaux ad hoc

Actuellement les travaux qui ont été réalisés pour offrir une meilleure qualité de service pour les applications multimédia reposent sur certains aspects liés aux réseaux ad hoc qui sont, les modèles de qualité de service pour les MANETs. Un modèle de qualité de service définit quels types de service peuvent être fournis dans un réseau et les mécanismes utilisés afin d'offrir ces services (les fonctionnalités que doit fournir un protocole de routage, l'architecture des nœuds, etc.). Le modèle de qualité de service spécifie l'architecture qui va nous permettre d'offrir un service meilleur que celui offert par le modèle best-effort traditionnel existant dans MANETs. Cette architecture doit prendre en considération les défis imposés par les réseaux comme le changement de la topologie, la capacité des liens, les contraintes de délai et de fiabilité. Cependant, des modèles tels que Intserv/ RSVP et DiffServ sont les modèles de qualité de service proposés par l'IETF pour les réseaux filaires. Les études menées montrent que ces modèles s'avèrent inadaptée à l'environnement ad hoc, parce qu'ils ne prennent pas en compte les contraintes de limitation de ressources imposées par ces réseaux. IntServ requiert un volume de traitements important, ce qui engendre des problèmes de consommation dans les mobiles. De plus, les paquets de signalisation de type RSVP ne sont pas adaptés à ce type de réseaux car ils utilisent une quantité non négligeable de bande passante sur des liens déjà limités. Enfin, le processus de maintenance des routes n'est pas adapté au caractère dynamique des réseaux ad-hoc. Le modèle *DiffServ* semble plus adapté aux réseaux MANETs. Pour résoudre le problème de passage à l'échelle, ce modèle utilise une granularité par classe, où aucune signalisation pour la réservation de ressources n'est utilisée. Cependant, la question de la définition des nœuds de bord¹ et des nœuds de cœur² reste très ambiguë dans ces réseaux. Intuitivement, la source fait parti des routeurs de bords et les nœuds du chemin font parti des routeurs de cœur. Mais dans les MANETs, chaque nœud doit pouvoir jouer les deux rôles à la fois, puisqu'il peut être source d'une communication et relais pour une autre. Cela engendrerait donc une charge trop importante sur tous les nœuds du réseau. Cependant, il a été conçu pour des cœurs de réseaux possédant une bande passante importante et dont la topologie est relativement statique.

Le modèle FQMM (*Flexible QoS Model for MANETs*)

FQMM [41] est le premier modèle de QoS proposé pour les MANETs en 2000 par Xiao et al. Il repose sur une topologie réseau plate, il a été conçu pour des réseaux de petite ou de moyenne taille avec moins de 50 nœuds formant ainsi un domaine DiffServ. FQMM combine les propriétés des modèles IntServ et DiffServ afin d'obtenir les deux types de granularité (par flot ou par classe), c'est pour cela qu'il est considéré comme un modèle hybride. Il définit de la même façon que DiffServ trois types de nœuds (Figure 2.4) qui sont :

¹ Nœuds de bordure (Edge nodes) : responsables de la classification des paquets et du conditionnement du trafic.

² Nœuds du cœur (core nodes) : responsables du transit des paquets. Les routeurs du cœur du réseau traitent plutôt des classes de paquets que des flux de paquets et chaque classe est constituée d'un ensemble de flux utilisateurs.

- **Les nœuds d'entrée (ingress node) :** Sont des nœuds mobiles qui permettent d'envoyer des données.
- **Les nœuds intermédiaires (core node ou interior node) :** Sont des nœuds intermédiaires qui transmettent des données vers d'autres nœuds.
- **Les nœuds de sortie (egresse node) :** Sont des nœuds destinataires.

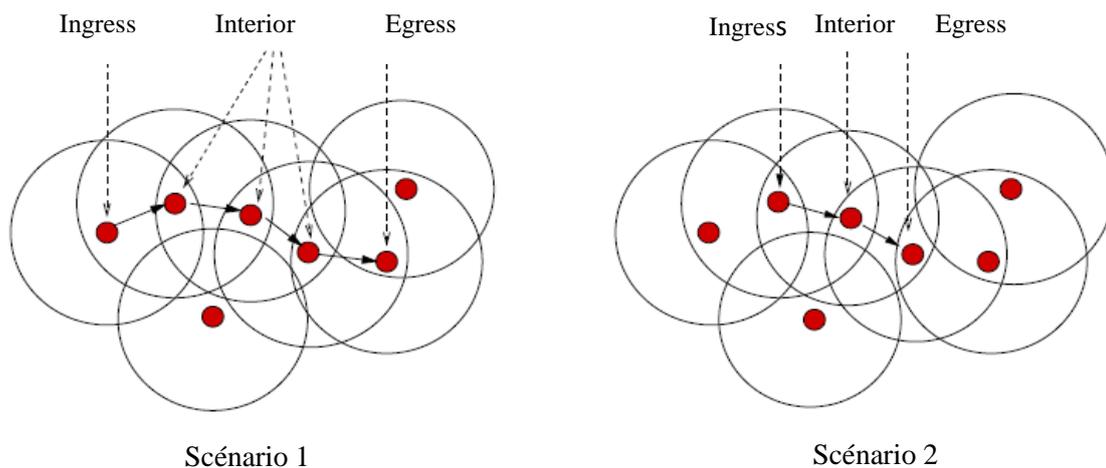


Figure 2.4 Les types de nœuds du modèle FQMM.

FQMM repose sur la couche IP qui coopère avec la couche MAC. Deux plans peuvent être distingués, le plan de relayage de données et le plan de contrôle et de gestion. Ce modèle requiert l'utilisation d'un protocole de routage capable d'offrir une certaine qualité de service, c'est-à-dire capable de rechercher des routes satisfaisant certaines contraintes de QoS.

Ce modèle offre l'avantage d'interfacer le réseau avec l'Internet, vu les mécanismes de qualité de services offerts qui sont proches des protocoles filaires. Cependant, plusieurs mécanismes ainsi que l'interaction avec la couche MAC restent à définir pour s'adapter aux conditions variables du réseau ad hoc. La résolution de la plupart des problèmes liés au fonctionnement ad-hoc (volume de signalisation, consommation d'énergie, bande passante limitée et difficile à estimer) est laissée à la charge du protocole de routage sous-jacent. En revanche, ce modèle souffre de plusieurs problèmes [43]:

- L'absence de tout contrôle explicite du nombre de services par flux offerts pose un problème de scalabilité, comme dans le cas du modèle *IntServ*.
- Dans *DiffServ*, les nœuds intermédiaires expédient les paquets selon leurs PHB dans le champ DS. Il est donc difficile de coder le PHB dans le champ DS s'il contient une granularité par flux (taille limitée du DS égale à un octet sans extension).
- Il est très difficile de faire un profil dynamiquement négocié du trafic.

- La résolution de la plupart des problèmes liés au fonctionnement ad hoc (tels que le volume de signalisation, la consommation d'énergie et la bande passante limitée) est laissée à la charge du protocole de routage sous-jacent.

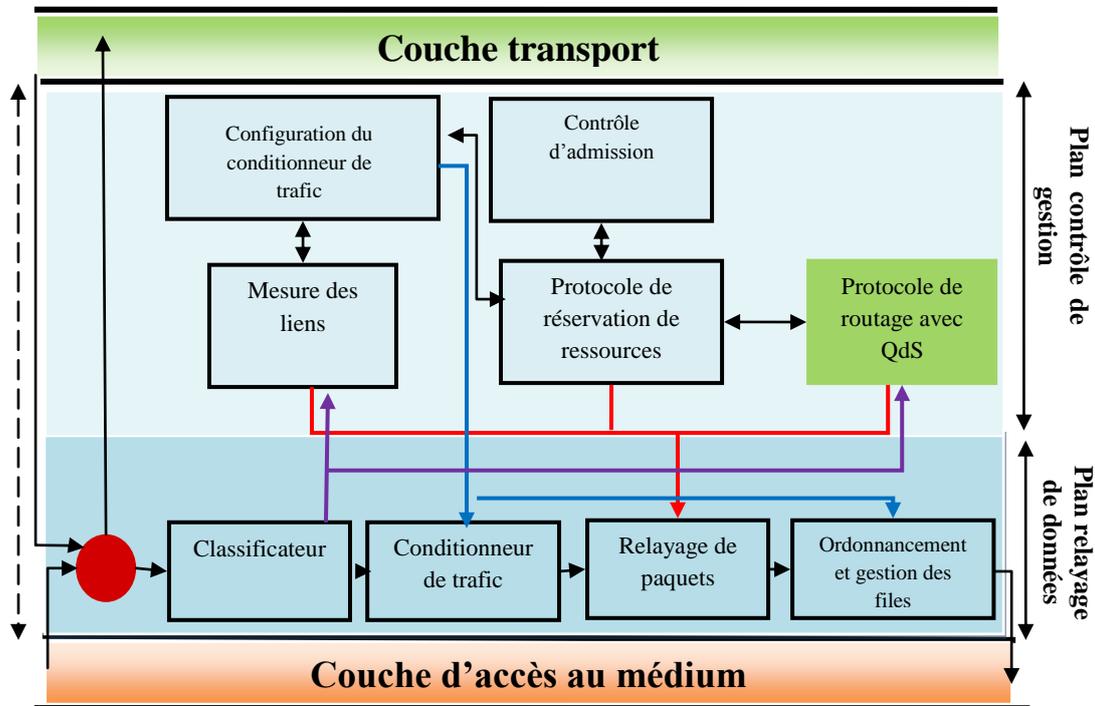


Figure 2.5 Le modèle FQMM.

Le modèle SWAN (*Service differentiation in wireless ad hoc networks*)

Le modèle SWAN [42] est basé sur des algorithmes de contrôle distribués afin d'assurer une différenciation de service dans les réseaux mobiles ad hoc de façon souple et robuste. Ce modèle offre la priorité (au niveau paquet) aux trafics temps réel en contrôlant la quantité de trafics best effort acceptée par nœud. Pour qu'un nouveau trafic temps réel soit accepté, le contrôle d'admission doit sonder la bande passante (minimale) disponible sur le chemin emprunté par le trafic (obtenue à l'aide d'un protocole de routage) avant de prendre la décision à la source. Pour maintenir la qualité de service des trafics déjà acceptés, le débit des trafics best effort est régulé en utilisant les mesures de délais au niveau MAC comme paramètre. Un classificateur et un shaper permettent de différencier les deux types de trafic. En cas de congestion, les bits ECN (Explicit Congestion Notification) de l'entête des paquets IP sont positionnés pour permettre à la source de ré-initier le contrôle d'admission. Si la route ne dispose pas d'assez de bande passante, le trafic est supprimé. Ainsi, SWAN permet de fournir une QoS logicielle (soft QoS). Un flux prioritaire admis n'est pas sûr d'avoir des garanties pour l'entière durée de la communication, et peut à tout moment être violé par d'autres demandes de trafics. Un mécanisme de contrôle de débit des flux best effort n'est pas à lui seul suffisant pour offrir des garanties aux applications temps réel. En outre, dans cette

approche, le protocole de routage ainsi que la couche d'accès au médium sont de type best effort [43].

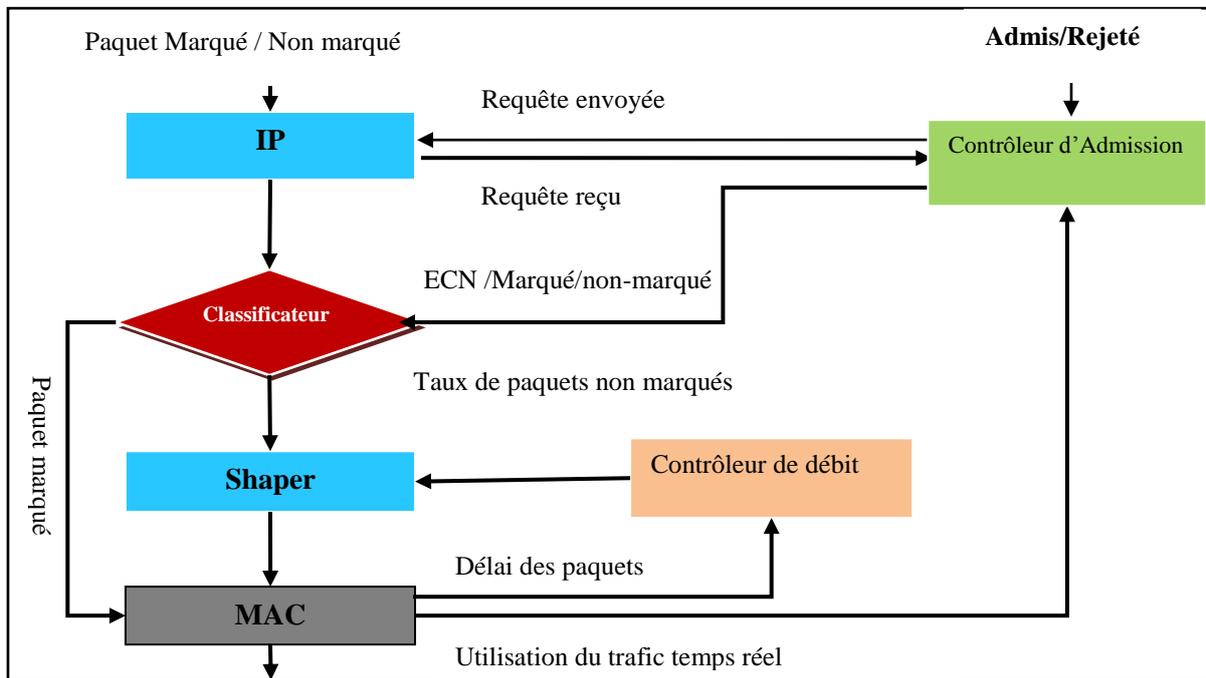


Figure 2.6 Le modèle SWAN.

Le modèle iMAQ (Integrated Mobile Ad hoc Quality of Service framework)

Le modèle iMAQ [44] illustré à la figure 2.7 fournit le support des transmissions des données multimédia dans un MANET. Ce modèle inclut une couche ad hoc de routage et une couche de service logiciel (Middleware). Dans chaque nœud, ces deux couches partagent les informations et communiquent afin de fournir les garanties de qualité de service aux trafics multimédia. La couche réseau utilise un protocole de prédiction de la position des nœuds (predictive location-based) orienté qualité de service. La couche Middleware communique également avec la couche réseau et la couche application et essaie de prévoir le partitionnement du réseau pour offrir la meilleure qualité de service. Pour fournir une bonne accessibilité aux données, elle réplique les données entre les différents groupes du réseau avant d'effectuer le partitionnement [43].

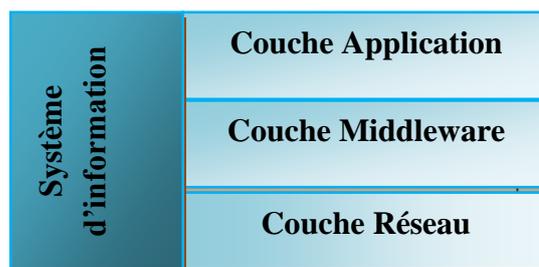


Figure 2.7 Le modèle iMAQ.

2.4.3 Le routage avec qualité de service dans les réseaux ad hoc

Le routage avec QoS est un élément clé pour réaliser une architecture de QoS pour les MANETs. Le but d'un protocole de routage avec QoS est de fournir des routes qui satisfassent un ou plusieurs critères de la QoS. Plusieurs métriques peuvent être utilisées telles que le délai, la bande passante ou encore le coût de transmission. Selon le type de contraintes, la recherche de routes optimales peut devenir un problème NP-complet. En effet, toute route satisfaisant un certain critère quantitatif ou qualitatif peut être qualifiée de route assurant une certaine qualité de service. Le routage avec qualité de service ajoute en général à des protocoles de routage usuels un contrôle d'admission afin de sélectionner parmi les routes disponibles celles qui satisfont les contraintes du flux. Le principal problème de ce type de protocole est le surcoût engendré [21].

À cause du changement de la topologie, la capacité de traitement et la limitation de la bande passante, les MANET exigent des contraintes additionnelles à celles des réseaux filaires. L'émergence des services multimédia dans les réseaux mobiles Ad hoc, les forts besoins de garantir la qualité de service et les contraintes particulières de ces réseaux ont amené à développer des protocoles de qualité de service (QoS) dédiés pour les réseaux Ad hoc. Pour cela, plusieurs protocoles avec qualité de service ont été proposés, tels que le protocole QOLSR [45], qui est une version enrichie avec un support de QoS du protocole de routage OLSR. Ce protocole utilise également le délai et la bande passante comme critères de recherche du plus court chemin.

CEDAR ou (Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing Algorithm) [46] est un protocole réactif avec qualité de service basé sur une élection dynamique d'un cœur de réseau stable. Le processus distribué d'élection de ces nœuds est local et dynamique. Le rôle des nœuds du cœur est de propager efficacement des informations sur la bande passante disponible dans les liens, d'assurer le routage dans le réseau en impliquant un minimum de nœuds dans ce processus et de limiter autant que possible les diffusions. La distance de propagation des informations dépend de la qualité du lien en terme de stabilité et de bande passante disponible.

CEDAR repose sur l'utilisation de protocoles d'accès au canal de type CSMA/CA minimisant les risques de collision qui doivent être capables d'estimer la bande passante disponible sur les liens. Les nœuds à l'extrémité des liens mesurent les variations de bande passante sur ces liens et propagent ces informations. Afin de résoudre les problèmes liés à la mobilité, on conserve des routes de secours utilisées pendant le temps de reconstruction de la route principale lorsque celle-ci est perdue. La reconstruction peut être locale, à l'endroit de la cassure ou être à l'initiative de la source.

BRuIT (Bandwidth Reservation under InTerferences influence) [47] est un protocole de QoS qui prend en compte la notion de zone de détection de porteuse. BRuIT approxime la zone de détection de porteuse par le voisinage à deux sauts. Périodiquement, chaque nœud fournit des informations sur la quantité de bande passante qu'il utilise pour router un flux, ainsi que sur celle utilisée par ses voisins, en envoyant des messages Hello. Le principal inconvénient de cette méthode, est que l'approximation de la zone de détection de porteuse par le voisinage à deux sauts n'est pas toujours correcte [45].

Ticket-Based QoS Routing [48] est un protocole de routage distribué, qui autorise des informations d'état imprécises durant la phase de calcul de la route. Il permet de réduire la quantité des messages de routage diffusés pour la découverte de la route, en publiant un certain nombre de "tickets logiques". Chaque message de découverte (ou d'observation) de route doit avoir au moins un ticket. Quand un message arrive à un nœud, il peut être divisé en plusieurs messages d'observation, qui sont relayés vers les prochains sauts. Chaque message "fils" contiendra un sous ensemble des tickets de son message "père". Evidemment, un message ayant un seul ticket ne peut être divisé. Lors de l'arrivée d'un message de découverte de route à la destination, le chemin saut par saut est connu et les informations de délai ou de bande passante peuvent être utilisées pour effectuer la réservation de ressources pour la route répondant aux besoins de QoS. Le nombre de tickets générés est fonction de la précision des informations d'états disponibles à la source et les besoins de QoS de la communication. Plus de tickets sont publiés dans le but d'augmenter la chance de trouver un chemin désiré. Dans les réseaux filaires, une distribution de probabilité, selon des informations sur le délai ou la bande passante, peut être calculée. Cependant, cela reste inapproprié dans les réseaux ad hoc où les liens sans fil sont sujets à des cassures, où les informations d'états sont imprécises. Pour cela, un modèle simple a été proposé pour l'algorithme Ticket Based. Il utilise l'historique et l'estimation des variations du délai, et une formule de lissage pour calculer le délai courant. Pour s'adapter aux changements de topologie, l'algorithme autorise différents niveaux de redondance de route. Il utilise aussi des techniques de réparation et de reroutage pour la maintenance des routes. La réparation des routes se fait en utilisant des reconstructions locales.

LTM (Lantern-Tree-based QoS On-Demand Multicast Protocol) [49]: est utilisé pour fournir un routage multicast avec qualité de service. Ce protocole partage le temps en slots au niveau de la couche MAC. Dans ce modèle la bande passante disponible est mesurée en terme de nombre de slots libres. Au début il commence à partager les slots de temps entre tous les nœuds voisins et rechercher l'ordonnancement idéal des slots libres. Ce protocole offre une bonne utilisation de la bande passante surtout lorsque celle-ci est limitée. Les principaux inconvénients engendrés par ce protocole sont :

- Le gaspillage des ressources à cause du nombre important d'informations stockées sur les sous-chemins.

- Il faut beaucoup de temps pour trouver tous les chemins et pour partager les intervalles de temps entre les nœuds voisins.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur la qualité de service dans les réseaux filaires et les réseaux sans fil Ad hoc. Nous avons spécifié les besoins en QoS des utilisateurs d'applications à travers des paramètres de performance tels que le délai de bout en bout, la gigue, le taux de perte, le débit. Puis, en parcourant les protocoles implémentés du modèle Internet, nous constatons qu'il existe, à chaque couche, des fonctionnalités et mécanismes de QoS capables de répondre aux divers besoins de ces applications les plus exigeantes.

Chapitre 3

La Qualité de service dans les Réseaux de capteur sans fil

3.1 Introduction

Nous avons évoqué au cours du chapitre précédent, les différentes solutions de qualité de service qui ont été développés dans les réseaux filaires et les réseaux sans fil (ad hoc). Dans ce chapitre, nous présentons la qualité de service dans les réseaux de capteur sans fil, ses perspectives, problématiques liées à la QoS dans les RCSF. Ensuite, nous discutons un état de l'art des travaux de recherche dédiés aux protocoles de communication avec QoS pour les RCSF au niveau de chaque couche du modèle OSI.

3.2 La qualité de service dans les réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sont des réseaux composés de nœuds communicants à fortes contraintes (calcul, énergie, stockage, etc.). Chaque capteur génère des données (La température, la pression, sur l'humidité, le bruit, les conditions d'éclairage, etc.) qu'il doit ensuite transmettre à une ou plusieurs stations de base par communications multi-sauts. Dans ces réseaux, les liens sans fils sont à faible débit et à taux de pertes élevés. Les réseaux de capteurs sans fils sont mis au service d'applications nécessitant des opérations complexes (e.g. soins de santé, surveillance industrielle). Cette utilisation soulève de nouveaux problèmes liés aux exigences de qualité de service (QoS) inhérentes à ces applications. Cependant, supporter la qualité de service s'avère difficile au vu des ressources très limitées des capteurs sans fils, de la faible qualité des liens radios ainsi que des environnements de déploiement [50].

3.2.1 Les perspectives de la qualité de service

Les perspectives de la qualité de service peuvent être classées en deux catégories :

Qualité de service spécifique à l'application

La perspective spécifique à l'application se base sur la qualité de l'application elle-même, pour cette perspective on peut considérer les paramètres de QoS suivants [51]: la couverture, l'exposition, les erreurs de mesure, et le nombre optimal de capteurs actifs. En bref, l'application impose des exigences spécifiques sur le déploiement des capteurs, le nombre de capteurs actifs, la précision des mesures de capteurs et ainsi de suite, qui sont directement liés à la qualité de l'application.

Qualité de service spécifique au réseau

Cette approche définit la qualité de service fournie pendant la délivrance des données dans le réseau de communication. De ce point de vue, des ressources de réseau sont utilisées

efficacement dans chaque couche de la pile protocolaire pour répondre aux exigences imposées par les données transportées, comme latence, perte de paquets, fiabilité etc. Bien que nous ne puissions pas analyser chaque application éventuelle dans les réseaux de capteurs, il est possible d'analyser chaque classe d'applications classées par les modèles de délivrance de données. Dans ce cas on n'est pas concerné par l'application mais nous sommes concernés par la façon dont laquelle les données sont envoyées vers le nœud sink. Il existe essentiellement trois types de modèles de délivrance de données : modèles orientés événements (Event-driven), orientés requêtes (query-driven), et le modèle de délivrance continue (Continuous) [51].

- **Le modèle Orienté événements (Event-driven) :** Dans ce modèle, les nœuds capteurs envoient leurs données seulement si un événement intéressant se produit. On peut citer l'exemple de surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Au départ, cette classe d'application était conçue à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille. Par la suite, cette classe a rapidement trouvé de nouvelles perspectives comme le contrôle industriel, le contrôle médical des patients, la surveillance d'édifices (barrages, ponts, voies de chemins de fer, etc.). Ceci est lié à la qualité et la précision de l'observation des phénomènes contrôlés, la fiabilité, la rapidité de délivrance de l'information sur l'événement détecté. Lorsque plusieurs nœuds capteur détectent le même événement et génèrent des données connexes, ces applications ne sont pas considérées comme des applications de bout-en-bout. Également la création d'un trafic redondant par les capteurs est très susceptible d'être observée dans les applications de type Event-driven.
- **Orienté requêtes (Query-driven):** Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires. Le Contrôle de l'environnement et la surveillance des maisons sont des exemples de cette classe.
- **Le modèle de délivrance Continue (continuous):** avec la délivrance continue, les nœuds capteurs transmettent périodiquement les données collectées au Sink suivant un volume de trafic prédéterminé. Ce modèle peut être considéré comme le modèle de base pour la surveillance traditionnelle des applications basées sur la collecte de données.
- **Le modèle Hybride:** Ce modèle met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau orienté requête (Query-driven) et un réseau de collecte de données par événements (Event-driven). Par exemple, pendant les longues périodes

d'inactivité des capteurs et lorsque aucun objet n'est présent, le réseau peut assurer une fonction de surveillance.

3.2.2 Problématique de la QoS dans les réseaux de capteurs sans fil

Implémenter un ou plusieurs mécanismes de QoS sur un réseau sans fil, dense, hautement dynamique, composé de nœuds ayant une faible capacité de mémoire et processeur, à forte contrainte énergétique et utilisant des modèles de trafic non traditionnels est une tâche difficile. Néanmoins elle est nécessaire car plusieurs types de trafic peuvent circuler dans le réseau. La relation énergie/QoS est particulièrement intéressante, car les deux objectifs sont antagonistes ; le premier vise la minimisation de la consommation d'énergie et l'autre vise la satisfaction des contraintes liées au trafic. Parmi les défis de QoS [2], [51]:

Capacités de stockage, puissance de calcul et ressources énergétiques limitées : En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse. De plus, les capteurs sont caractérisés par une bande passante limitée. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Le but de ce faible débit est de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds.

Déploiement des nœuds : Le déploiement des capteurs est la première opération dans le cycle de vie d'un réseau de capteurs. On peut envisager plusieurs formes de déploiements selon les besoins des applications. Les nœuds peuvent être déployés aléatoirement d'un avion ou d'une roquette par exemple, ou bien ils peuvent être placés un par un d'une manière déterministe par un humain ou un robot. Le déploiement peut être fait d'un seul coup ou bien peut être un processus continu en redéployant d'autres capteurs dans une même zone. Dans un grand nombre d'applications, le déploiement manuel est impossible. De plus, même lorsque l'application permet un déploiement déterministe, le déploiement aléatoire est adopté dans la majorité des scénarios à cause de raisons pratiques tels que le coût et le temps. Cependant, le déploiement aléatoire ne peut pas fournir une distribution uniforme sur la région d'intérêt, ce qui déclenche de nouveaux problèmes dans les réseaux de capteurs.

Topologie dynamique : 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 (champ de bataille par exemple), 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.

Durée de vie du réseau : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

Bande passante limitée : Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

La redondance des données : les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de petits nœuds capteurs donc, un événement peut être détecté par un ou plusieurs capteurs ce qui conduit à une redondance de données. Cette redondance permet un transfert de données fiable, mais aussi elle peut provoquer une délivrance de données inutiles dans le réseau. Des mécanismes d'agrégation/fusion de données peuvent diminuer la redondance mais également peuvent introduire un délai et une complexité supplémentaire. Par conséquent, des mécanismes efficaces de QoS sont nécessaires pour faire face à la redondance des données.

Plusieurs types de trafic : les nœuds capteurs hétérogènes peuvent générer différents types de trafic. Par exemple, certaines applications nécessitent un mélange de capteurs pour surveiller la température, la pression, l'humidité etc. Un tel environnement hétérogène rend la QoS dans les RCSF plus difficile [52].

La présence de plusieurs nœuds Sink : le réseau de capteur peut y avoir plusieurs nœuds Sink, qui imposent des exigences différentes sur le réseau. Par exemple, un nœud puits peut interroger tous les nœuds capteurs situés dans le nord-est du champ de captage pour envoyer un rapport sur la température chaque minute, tandis qu'un autre nœud Sink peut répondre uniquement lorsque la température est élevée dans la zone du sud-ouest. Le réseau doit être capable de supporter des différents niveaux de qualité de service associés à des puits différents.

Passage à l'échelle : Les capteurs dans un RCSF peuvent atteindre l'ordre des centaines ou des milliers.

Par conséquent, pour supporter la QoS dans les réseaux de capteurs sans fils il faut prendre en compte au moins quelques-uns des défis décrits ci-dessus

3.2.3 Métriques et paramètres de qualité de service

Dans cette section nous présentons les différentes métriques qui permettent de quantifier les exigences de qualité de service comme par exemple : l'optimisation du débit et débit utile, minimisation du délai, maximisation de la fiabilité, la réduction de la gigue, l'utilisation efficace de l'énergie etc.

Minimiser le temps d'accès au médium : Il est certain que pour réduire au minimum le délai de bout-en-bout des transmissions, la performance de la couche réseau doit être prise en compte. En outre, La couche MAC permet de minimiser le temps d'accès au médium.

Diminuer les collisions : les collisions, et par conséquent les retransmissions, ont un impact direct sur les paramètres du réseau tels que le débit, le délai et l'efficacité énergétique. La couche MAC est responsable de réduire le nombre de collisions. Les collisions peuvent être évitées par plusieurs méthodes de détection, comme l'adaptation de la fenêtre de contention selon les exigences du trafic, par l'utilisation des protocoles basés sur la contention. En plus, l'adaptation du nombre de slots de temps, de la fréquence avec les besoins du réseau peuvent diminuer les collisions.

Maximiser la fiabilité : cette métrique est liée à la minimisation des collisions, un mécanisme d'acquittement peut être utilisé afin de déterminer les pertes de paquets et par conséquent les retransmissions peuvent être effectuées pour corriger ces problèmes.

Réduire la consommation de l'énergie : L'efficacité de l'énergie est une contrainte importante dans les réseaux de capteurs sans fil en raison de la limitation des batteries des nœuds capteurs.

Minimiser les interférences et maximiser la concurrence (transmissions parallèles) : comme le support de transmission sans fil est partagé, toutes les transmissions indésirables au sein du même réseau ou bien les transmissions des autres réseaux qui partagent les mêmes parties du spectre contribuent à des interférences sur les transmissions. Les interférences provoquent la perte des paquets. Maximiser la concurrence tout en minimisant l'impact des interférences des transmissions parallèles peuvent contribuer à ces métriques.

Maximiser l'adaptabilité aux changements : les réseaux de capteurs sont caractérisés par leur topologie dynamique: les nœuds capteurs peuvent épuiser leurs batteries, d'autres nœuds peuvent être ajoutés au réseau, les liens entre les nœuds peuvent être modifiés en raison des conditions de l'environnement ou des changements topologiques. Par conséquent, les protocoles de communications devraient prendre en considération l'adaptation du réseau aux changements de topologie.

3.3 Protocoles avec gestion de la qualité de service pour les RCSF

Comme tous les autres réseaux, La garantie de la qualité de service dans les RCSF peut se faire selon plusieurs approches et les mécanismes utilisés peuvent exister dans tous les niveaux du modèle OSI.

3.3.1 La couche réseau

La couche réseau est responsable de l'obtention de routes efficaces qui tiennent compte de la consommation de l'énergie, qui sont stables et qui satisferont les paramètres de qualité de service demandés par l'application. Les protocoles de routage participent à la garantie de la

qualité de service par le choix du chemin optimal en vue de transmettre les paquets tout en respectant les besoins de l'application à travers plusieurs techniques de routage, L'objectif du protocole de routage dans ce cas est de trouver le chemin le plus court, mais qui offre une garantie des besoins requis par l'application cible. Les protocoles de routage existant offrent aussi une garantie de QoS soit probabiliste ou déterministe [53].

Il existe de nombreux protocoles conçus pour les RCSF qui peuvent garantir de la QoS de bout en bout à ce niveau du modèle OSI (couche réseau), parmi ces protocoles :

SPEED [54] est un protocole de routage à temps réel souple basé sur la localisation géographique. Il part de l'hypothèse suivante : le délai de bout en bout dépend de la distance entre la source et la destination. Il essaie, ensuite, de garantir la vitesse de délivrance des paquets à travers le réseau de capteurs de manière à ce que ce délai de bout en bout soit proportionnel à la distance entre la source et la destination. La vitesse de délivrance est une contrainte qu'on peut définir au niveau application.

Le routage dans SPEED se fait de la manière suivante : Lorsqu'un paquet arrive à un nœud i celui-ci sélectionne les voisins qui sont plus proches que lui vers la destination. Ensuite parmi cet ensemble, il sélectionne un sous ensemble de nœuds qui ont une vitesse de relais supérieure à une certaine valeur fixée S_{set} (qui dépend de la taille du paquet, de la bande passante disponible et de la couverture radio). La vitesse de relais est le quotient de la distance entre i et le voisin de i sur le délai pour atteindre ce voisin.

Ensuite, le candidat pour la transmission est choisi parmi cette sous liste (le choix est probabiliste).

Enfin, si cette sous liste est vide, un premier mécanisme d'adaptation de trafic est appelé pour tenter de diminuer la valeur de S_{set} . Dans le pire des cas le paquet est supprimé. Afin de maintenir la vitesse désirée, SPEED emploie un deuxième mécanisme de régulation du trafic qui permet de diminuer la charge sur un nœud donné en agissant sur le trafic émis par tous ces prédécesseurs. Le trafic est détourné vers d'autres nœuds ou bien il est supprimé.

Plusieurs variantes de SPEED ont été développées comme par exemple "Multi-path and Multi-speed Routing" **MMSPEED**, qui utilise des chemins multiples et supporte la différenciation de service à travers l'utilisation de vitesses de relais qui varient en fonction de la classe du trafic.

Le protocole **SAR** Présenté par Sohrabi et al. [55], [59] appartient à la catégorie des protocoles basés sur l'approche DiffServ. Il utilise le schéma de priorités constantes pour chaque paquet. Pour ce protocole, chaque paquet qui appartient à un flot donné, a une valeur constante de la priorité et cette valeur reste fixe tout le temps que le paquet traverse la route vers sa destination. SAR utilise une approche multi route basée sur des tables de routage pour découvrir de différentes routes qui répondent aux exigences de QoS et de conservation de l'énergie dans le réseau de capteurs. Le nœud source sélectionne une route particulière parmi toutes les routes découvertes pour l'utiliser dans la transmission d'un flot donné. Cette sélection est faite en tenant compte des exigences de délai du flot et les intentions

d'équilibrage de charge de la source. Les nœuds intermédiaires de la route choisie prennent en compte la priorité du paquet au moment de le transmettre.

L'avantage de cette approche est sa capacité de supporter plusieurs classes de trafic. Toutefois, son majeur inconvénient est l'utilisation des tables dans la mémoire des capteurs pour réaliser le routage. En effet, cette table requiert une quantité significative de mémoire dans chaque nœud capteur et, évidemment, cette méthode n'est pas extensible aux réseaux assez grands. De même, le fait qu'un paquet ne peut jamais changer de priorité empêche que les nœuds réagissent à des changements inattendus dans le réseau.

Le protocole DARA (Distributed aggregate routing algorithm) [56] considère les paramètres de QoS suivants: la fiabilité, le délai des transmissions, la consommation de l'énergie, et définit deux types de paquets : paquets critiques et non critiques. La même métrique pondérée est utilisée pour les deux types de paquet où la seule différence est qu'un ensemble de nœuds de capacité énergétique élevée est élu pour router les paquets critiques. Pour estimer le délai, les auteurs utilisent la théorie de file d'attente et suggèrent une méthode qui, en pratique nécessite une grande capacité de stockage.

Energy-Aware QoS Routing Protocol est un protocole avec gestion de la QoS pour les RSCF. Il utilise un schéma de priorités constantes c-à-d tous les paquets temps-réel sont considérés comme étant de même priorité [57]. Ce protocole se base sur le concept du < coût-de-lien > qui est défini à partir de l'énergie résiduelle de chaque nœud capteur, l'énergie consommée pendant la transmission, le taux d'erreurs et d'autres paramètres. Tout le trafic du réseau est divisé en deux classes : best-effort et temps réel, au niveau de chaque nœud, chaque classe de trafic est stockée dans une file d'attente séparée.

Le protocole recherche toutes les routes possibles. Par la suite, la source sélectionne celle qui satisfait les exigences du délai de bout-en-bout du paquet, puis elle envoie le susdit paquet au prochain nœud dans la route. Chaque nœud intermédiaire effectue une classification des paquets (temps-réel ou best-effort). L'algorithme utilisé par ce protocole ne permet pas de bloquer les paquets best-effort. L'intérêt de cet algorithme réside dans le fait qu'il garantit la transmission des paquets best-effort tout en maximisant le débit du trafic temps réel. Le principal inconvénient de cette approche est le manque de supporter différentes priorités du trafic temps-réel. Dans une application multimédia, les paquets pourraient avoir des exigences de QoS différentes, et pour ce motif, cette approche ne satisfait pas ce besoin. D'autre part, l'algorithme qui calcule les routes multiples a besoin d'une connaissance complète de la topologie du réseau par chaque nœud. En effet, nous pouvons affirmer que cette approche n'est pas évolutive.

PRAR [24] est un protocole de routage dit à temps réel souple : Il essaie de garantir les délais de communication exigés par les applications tout en consommant moins d'énergie. Il se base sur l'hypothèse suivante : plus l'énergie est élevée plus les délais de transmissions sont faibles. Ainsi le protocole établit un compromis entre la consommation d'énergie et les délais de transmissions. On appelle vélocité le rapport entre la distance parcourue par un

paquet et son délai de bout en bout. PRAR se base sur le routage géographique. L'amélioration consiste à adapter dynamiquement la puissance de transmission selon les exigences de l'application. En effet, RPAR considère chaque paquet à part lors du processus de routage. Il transmet le paquet au nœud qui offre le meilleur choix en terme de consommation d'énergie. Un nœud voulant transmettre un paquet calcule les vitesses offertes par ses voisins (appelés choix de transmission). Il détermine ensuite ceux qui peuvent offrir une vitesse supérieure à celle requise par le paquet (la vitesse requise pour assurer l'arrivée dans les temps du paquet) ; ce groupe de nœuds est appelé choix de transmissions éligibles. Enfin, il estime le coût d'énergie qui sera consommée lors de la transmission du paquet aux nœuds éligibles. Le prochain nœud choisi sera donc celui qui offre la vitesse requise tout en consommant le moins d'énergie.

3.3.2 La couche transport

En général la couche transport fournit deux services principaux:

- Un service fiable de délivrance de données.
- Des mécanismes de contrôle de congestion.

Les Protocoles de la couche transport développés pour les réseaux filaires et pour les réseaux sans fil ne peuvent pas être implémentés directement dans les RCSF. Par conséquent, la conception de nouveaux protocoles de transport pour les RCSF devrait prendre en considération les points suivants:

- La fiabilité pour les deux modes de communication : Sink-Capteurs et Capteurs -Sink.
- L'utilisation des bons mécanismes de contrôle de congestion pour augmenter l'efficacité du réseau et économiser l'énergie.
- L'auto-configuration pour s'adapter aux changements fréquents de la topologie du réseau.
- La contrainte d'énergie.

Il existe plusieurs protocoles avec QoS pour la couche transport dont [2]:

Event-to-Sink Reliable Transport Protocol (ESRT) [58] s'exécute au niveau de la station de base, et permet d'identifier les capteurs du réseau en minimisant l'utilisation de l'énergie. Ce protocole assure un transport fiable des données des capteurs vers la station de base sans avoir recours à une mémoire cache au sein du réseau, ce qui minimise l'énergie dépensée. De plus, ESRT est adapté aux RCSF car il ne repose pas sur l'identification des nœuds mais plutôt sur celle de l'événement détecté, quelle que soit sa source. ESRT permet aussi de contrôler le flux de données (Capteurs-Sink).

Reliable Multi-Segment Transport (RMST) [59] est un protocole qui tire profit de la corrélation des données transmises et utilise certains nœuds du réseau comme mémoire cache pour garantir l'acheminement de l'information des capteurs vers le Sink. L'arrivée des données

au Sink ne suppose pas l'arrivée de tous les paquets transmis mais plutôt de l'information globale qui est extraite de la corrélation et des données en cache, chaque fois que des paquets sont perdus. Bien que ce mécanisme contribue à conserver l'énergie en minimisant les retransmissions, il demeure peu adapté aux RCSF car il nécessite de la mémoire cache et une certaine capacité de calcul au niveau de certains nœuds pour le calcul de la corrélation. ESRT tire aussi profit de la corrélation entre les événements détectés. Cette corrélation est analysée au niveau de la station de base, qui ordonne aux nœuds de diminuer leurs flux respectifs dès qu'il détecte l'événement souhaité à partir des différentes lectures corrélées, sans garantir les arrivées individuelles des données envoyées par chacun des capteurs.

Pump Slowly, Fetch quickly (PSFQ) [60], [2] : est un protocole de transport basé sur une garantie locale d'arrivée des données, c'est-à-dire que chaque nœud intermédiaire doit conserver une copie du paquet transmis en cache jusqu'à s'assurer que ce dernier est bien arrivé au nœud suivant sur le chemin. Ceci évite de devoir transmettre le paquet perdu du Sink vers le nœud destinataire, mais plutôt de corriger localement une perte de paquet. Cependant, ce protocole ne permet pas de corriger localement la perte des paquets due à la congestion ou la saturation des tampons.

Le Tableau 3.1 résume l'ensemble des 3 protocoles de transport discutés ci-dessus:

Caractéristiques du protocole	ESRT	RMST	PSFQ
Résumé rapide des opérations de protocole	assure un transport fiable des données sans avoir recours à une mémoire cache,	Se base sur la corrélation des données transmises et utilise certains nœuds du réseau comme mémoire cache	chaque nœud conserve une copie du paquet en cache jusqu'à s'assurer qu'il est bien arrivé au nœud suivant
Type de la fiabilité	Fiabilité De bout-en-bout	Fiabilité Saut-par-saut (Hop-by-hop)	Fiabilité Saut-par-saut (Hop-by-hop)
Direction de circulation de l'information	Capteurs → Sink	Capteurs → Sink	Sink → capteurs
couche d'implémentation	La couche transport	Les couches MAC, transport et application	La couche transport
Type d'acquittement	Pas d'acquittement	NACKs	NACKs
mécanisme de Contrôle de congestion	Le nœud Sink mesure la congestion et fixe le taux de génération de paquets.	La retransmission Possible grâce aux nœuds intermédiaires qui réduit les implosions des NACK	Réduire les retransmissions inutiles
consommation d'énergie	Les nœuds récepteurs consomment plus d'énergie en raison des calculs intensifs	La transmission de données redondantes permet de consommer plus d'énergie	L'opération qui consomme plus d'énergie est la transmission du grand nombre de NACKs

Tableau 3.1 Caractéristiques des protocoles de la couche transport.

3.3.3 La couche MAC

La couche liaison de données assure le transfert correcte des données entre les nœuds dans un réseau étendu. La couche liaison de données est divisée en deux sous-couches: La couche MAC « Media Access Control » et La couche LLC « Logical Link Control ». La sous couche MAC gère l'accès au support de transmission selon le principe CSMA/CD, elle a aussi un impact considérable sur la consommation énergétique globale d'un réseau de capteurs, notamment via la mise en œuvre des stratégies d'allocation du canal et de mise en veille. La sous couche LLC permet d'établir un lien logique entre la couche MAC et la couche réseau. La sous-couche LLC a pour rôle de détecter les erreurs des données binaires issues de la couche physique. En pratique, il est courant d'utiliser un code cyclique redondant (CRC) pour vérifier l'intégrité des données reçues [24].

a) La qualité de service au niveau de la couche MAC

Rôles de la sous-couche MAC

La sous-couche MAC a pour rôle de mettre en œuvre les mécanismes suivants [24]:

- Les mécanismes d'accès au canal doivent permettre de gérer le contrôle d'accès et du partage du canal entre les différents nœuds qui désirent communiquer dans un réseau.
- Les stratégies de mise en veille des capteurs ont pour objectif de réduire la consommation d'énergie. Il est en effet essentiel qu'entre deux communications un capteur soit mis en veille afin de préserver l'état de charge de sa batterie. De plus, ces stratégies sont indissociables des mécanismes d'accès au canal. Leur définition impacte directement le comportement des mécanismes d'accès et réciproquement. Les trames de communications définissent la mise en forme syntaxique des données issues de la couche physique.
- Elles permettent entre autre d'initier les communications entre les entités, de gérer les modes de communications ou encore de détecter les éventuelles erreurs introduites par le canal de propagation. Leur mise en œuvre passe généralement par l'insertion de diverses informations (bits additionnels, entêtes, somme de contrôle ...) nécessaires au récepteur pour déterminer le début et la fin d'une trame ou chaque champ utile qui la compose (adresse, données, champs de synchronisation).
- La détection des erreurs introduites par le canal est quant à elle généralement réalisée via une somme de contrôle (checksum en anglais) qui est insérée par l'émetteur et ensuite vérifiée par le récepteur via la couche LLC.

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

Il existe deux grandes familles de protocoles MAC :

- les protocoles avec contention
- les protocoles ordonnancés (sans contention)

Protocoles avec contention, lorsqu'un nœud veut envoyer un paquet, il doit attendre que le medium soit libre. Dans ce cas, il y a toujours des risques de collisions qui provoquent le gaspillage d'énergie. En effet, minimiser les collisions entre les nœuds permet de réduire la perte d'énergie.

Protocoles ordonnancés, chaque nœud se voit attribuer une fenêtre temporelle durant laquelle il pourra émettre des paquets. On évite ainsi les risques de collisions. Toutefois ceci nécessite un coordinateur et la synchronisation des nœuds.

Ces deux familles de protocoles ne sont pas totalement disjointes et certains protocoles utilisent des propriétés de ces deux familles.

Mécanismes de qualité de service au niveau de la couche Mac

Chaque méthode qui aide à améliorer la performance de la couche MAC et qui permet de répondre aux exigences de qualité de service peut être considérée comme un mécanisme de qualité de service. Dans cette partie nous allons introduire les propriétés de ces mécanismes et comment ils fournissent la QoS [61], [52]:

1) les mécanismes d'adaptation au niveau de la couche MAC assurent la qualité de service en adaptant les paramètres de fonctionnement des nœuds capteurs aux conditions du réseau: le modèle de trafic, la topologie du réseau, la probabilité de collision, l'état du canal etc. Pour que les nœuds capteurs peuvent fixés leurs paramètres de fonctionnement comme: le cycle de vie, la taille de la fenêtre de contention, et essayent d'accommoder le trafic offert de façon plus efficace.

2) Contrôle d'erreur : le but principal des mécanismes de contrôle d'erreur est de réduire la consommation de l'énergie lors du transfert des données. Il existe trois mécanismes principaux utilisés pour le contrôle d'erreur qui sont : Automatic Repeat Request (ARQ), Forward Error Correction, (FEC) et Hybrid ARQ.

ARQ Automatic Repeat reQuest [62] (en français requête automatique de répétition) est une méthode de contrôle d'erreur pour la transmission de données. Elle utilise des acquittements et des timeouts pour parvenir à une transmission efficace de l'information. Un acquittement est un message envoyé par le récepteur vers l'émetteur afin de lui montrer que la trame (ou le paquet) de données émise a été correctement reçue. Un timeout est un instant précis situé après l'instant d'émission et dont l'écart avec ce dernier est égal à une durée

spécifique ; si l'émetteur ne reçoit pas d'acquiescement avant le timeout, il retransmet le paquet jusqu'à recevoir un acquiescement ou dépasser un nombre prédéfini de retransmissions.

Le Hybrid ARQ (HARQ) [62] est une variante de l'ARQ possédant de meilleures performances, en particulier lors des transmissions sans fil, au prix d'une complexité accrue. Hybrid Automatic Repeat reQuest (hybrid ARQ ou HARQ) est une technologie qui permet la transmission fiable de données sur un canal de communication qui peut engendrer des erreurs de transmission. HARQ combine les principes de la retransmission, Automatic Repeat Request (ARQ), et de la correction d'erreurs, Forward Error Correction (FEC).

Dans le cas d'un simple ARQ, des bits redondants sont ajoutés aux données à transmettre pour permettre au récepteur de détecter d'éventuelles erreurs de transmission, par exemple au moyen d'un contrôle de redondance cyclique. Si le récepteur détecte une erreur de transmission, il peut demander la retransmission des données à l'émetteur. Dans le cas d'un HARQ, les données sont en outre encodées au moyen d'un code de Forward Error Correction, qui ajoute également des bits redondants aux données originales et qui permet de corriger un certain nombre d'erreurs sans retransmission. Si le nombre d'erreurs est trop élevé pour être corrigé par le FEC, le récepteur demande la retransmission à l'émetteur.

3) Suppression et agrégation des données : les Mécanismes de suppression et d'agrégation des données tentent à minimiser les communications radios en réduisant la charge de trafic du réseau, ce qui génère des économies d'énergie. La redondance peut être éliminée par la suppression de l'ensemble de messages dépendant du même événement avant d'être transmis ou par la combinaison des données provenant de différentes sources. Cette élimination empêche également les congestions causées par la surcharge, diminue ainsi la probabilité de collision et améliore l'utilisation des ressources du réseau tel que la bande passante.

4) Contrôle d'énergie : L'idée principale du contrôle d'énergie est simplement d'ajuster l'énergie de transmission des nœuds capteurs selon la puissance minimale requise pour une transmission réussie. Plusieurs facteurs affectent l'énergie requise minimale tels que : la fréquence des bandes, les conditions du canal sans fil (Par exemple, le bruit, les chemins perdus...) et de la distance vers le récepteur.

Nous pouvons classer la réduction de la consommation d'énergie en tant que la principale contribution de contrôle d'énergie pour l'approvisionnement de la qualité de service. Cependant, la nature dynamique des liaisons sans fil rend la mise en œuvre du mécanisme de contrôle d'énergie une tâche difficile [61].

5) Clustering : Il est très difficile de fournir une synchronisation globale dans les réseaux de capteurs sans fil à cause du déploiement à grande échelle et le nombre important des nœuds capteurs. Ce défi a mené au développement des mécanismes de clustering pour simplifier la synchronisation en regroupant l'ensemble de nœuds capteurs voisins. Le groupement des nœuds en clusters permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, d'optimiser la ressource médium en la faisant gérer localement par un chef de cluster (le Cluster Head aussi appelé caryomme), de faciliter l'agrégation des données, de simplifier

la gestion du réseau et en particulier l'affectation d'adresses, d'optimiser les dépenses d'énergie par l'amélioration de la connectivité entre les nœuds et la facilité d'agrégation des données, et enfin de rendre le réseau plus scalable. L'utilisation de clusters permet aussi de stabiliser la topologie et la gestion du réseau si les tailles de clusters sont grandes par rapport aux vitesses de nœuds mais cela ne fonctionne que dans le cas d'une faible mobilité. par conséquent, ce mécanisme peut être utilisé pour fournir une qualité de service en termes de la consommation énergétique et de la fiabilité. Les algorithmes de Clustering peuvent être classés en statique et dynamique [61].

Les algorithmes de clustering statiques sélectionnent le chef et les membres du cluster une seule fois durant le déploiement ou la phase d'initialisation du réseau et le rôle des nœuds ne change pas. Toutefois, la durée de vie du réseau et la connectivité peuvent être gravement endommagée parce que le chef du cluster consomme beaucoup d'énergie et leur batterie s'épuise rapidement. Les algorithmes de clustering dynamique reconstruisent les clusters et modifient le chef de cluster en fonction de la topologie courante du réseau.

6) Différenciation de service : La différenciation de service est la technique principale utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil pour le support de la QoS. Cependant, utilisée seule, elle n'est pas suffisante pour obtenir des garanties déterministes. La QoS dans les réseaux de capteurs sans fil est donc largement best-effort [61].

Protocoles MAC

Les protocoles MAC peuvent être classés en trois catégories ; basés sur la contention, ordonnancés ou hybrides. Par la suite nous allons présenter un exemple pour chaque catégorie:

S-MAC [63] est un protocole basé sur la contention. Un nœud utilisant S-MAC enchaîne un cycle divisé en une partie active et une partie inactive. Durant la partie active, il écoute le canal et reçoit et envoie des données. Durant la partie inactive il désactive son récepteur pour préserver l'énergie. Les nœuds se synchronisent entre eux pour qu'ils se réveillent et se rendorment en même temps. Ainsi ils adoptent un rendez-vous commun. Le fonctionnement de cet algorithme est comme suit :

- Un nœud qui démarre écoute le canal.
- S'il découvre un nœud qui a déjà choisi ses périodes actives et inactives, il adopte le même choix.
- Sinon, il choisit lui-même ses périodes et annonce ses choix périodiquement.
- Si un nœud découvre qu'il n'a pas les mêmes périodes que son voisin, il adopte les deux.

S-MAC nécessite donc une synchronisation entre les nœuds pour assurer son bon fonctionnement. Cependant, elle n'est pas aussi exigeante que pour un protocole du type TDMA. En effet, S-MAC utilise des périodes actives assez longues, de l'ordre de centaines de

millisecondes, par rapport à la dérive de l'horloge interne. La partie active est elle-même divisée en deux parties ; une partie pour la transmission et la réception des messages de synchronisation et une autre pour la transmission et la réception des paquets de données [24]. La figure 3.1 montre un exemple de fonctionnement de S-MAC.

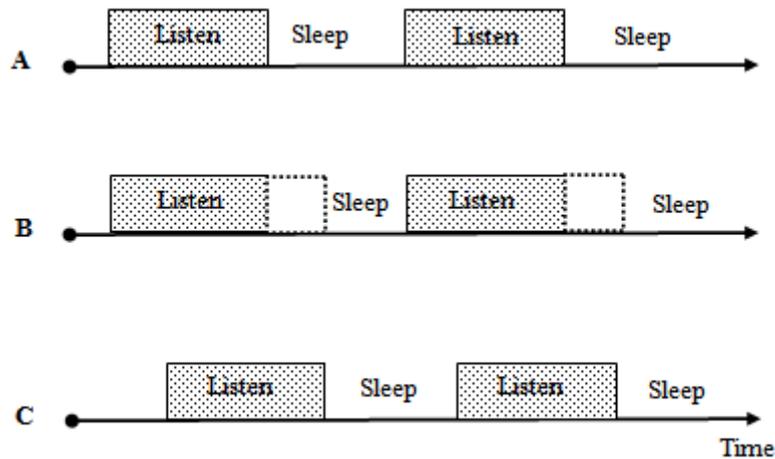


Figure 3.1 Fonctionnement du protocole S-MAC.

T-MAC [64] est une amélioration de S-MAC. Le protocole propose une gestion plus dynamique de la partie active. Un nœud transmet tous les messages en un burst au début de la partie active. De plus, l'intervalle maximal de contention est fixe (CW dans IEEE 802.11). Ainsi toutes les transmissions sont décalées au début de la partie active. De cette façon, un nœud se rendort s'il ne reçoit rien pendant un temps TA.

PEDAMACS [65] est un protocole MAC de type TDMA. Il repose sur deux hypothèses de base. Premièrement, le réseau est composé d'une station de base (SB) et d'un ensemble de capteurs sans fil. La SB peut atteindre tous les capteurs en un seul saut alors que les messages générés par les capteurs ont besoin de plusieurs sauts pour atteindre la SB. Deuxièmement, les capteurs génèrent des messages d'une façon périodique.

Le fonctionnement de PEDAMACS s'opère en quatre phases, toutes dictées par la SB. A chaque fois, la SB envoie un message annonçant le temps de début et de fin de chaque phase. La première phase est celle d'apprentissage de la topologie, durant laquelle tous les capteurs déterminent leurs topologies locales, à savoir leurs voisins, leur père et les nœuds interférents. Ensuite, la phase de collection de la topologie commence. Durant cette phase, tous les nœuds transmettent leurs topologies locales à la BS. Après l'apprentissage de la topologie du réseau (les deux premières phases), la SB ordonnance les slots de transmission et de réception de tous les nœuds du réseau et diffuse le résultat. Cette phase s'appelle la phase d'ordonnancement. A l'issue de cette phase tous les nœuds commencent à suivre l'ordonnancement et peuvent transmettre et recevoir des données. Notons que la synchronisation se fait toujours par rapport aux messages transmis par la SB puisqu'elle est capable d'atteindre tout le réseau en un seul saut. Les nœuds peuvent transmettre des données

de surveillance ainsi que des données de mise à jour de topologies (détection de nouveaux voisins par exemple). La dernière phase est celle d'ajustement, durant laquelle les nœuds et la SB mettent à jour leurs topologies locales et l'ordonnancement des slots, respectivement. Les phases d'apprentissage et de collection de la topologie sont exécutées une seule fois alors que la phase d'ajustement s'exécute d'une manière périodique.

PEDAMACS élimine le problème de synchronisation en utilisant un nœud capable d'atteindre tout le réseau. L'hypothèse adoptée par cette approche en limite son déploiement. L'économie de l'énergie se fait à travers l'utilisation de TDMA par les capteurs sans se soucier de la synchronisation et de l'ordonnancement.

Z-MAC [66] est un protocole MAC hybride. Il change dynamiquement de mode de transmission entre CSMA et TDMA en fonction de la charge actuelle du réseau. Z-MAC utilise CSMA comme protocole de base pour l'accès au support (en fait il utilise B-MAC) mais emploie un ordonnancement de type TDMA pour améliorer la résolution de contention entre les nœuds. Le temps est divisé en slots. Au début du déploiement, chaque nœud se verra attribuer un slot en utilisant DRAND, un algorithme distribué d'affectation de slots élaboré par les mêmes auteurs de Z-MAC. DRAND garantit que les slots des nœuds se trouvant à deux sauts entre eux ne se chevauchent pas. Une fois le slot affecté, le nœud l'utilise pendant chaque période prédominée, appelée trame. Ce nœud devient le propriétaire du slot. A l'opposé de TDMA, un nœud peut envoyer des données à n'importe quel slot avec Z-MAC. Par contre, le nœud propriétaire a la priorité pour envoyer ses données au cours de son slot. La priorité est implémentée en ajustant la fenêtre de contention initiale pour garantir aux nœuds propriétaires un accès privilégié au canal de transmission au cours de leurs slots respectifs. Bien qu'un nœud propriétaire ait un accès privilégié au cours de son slot, sa priorité n'est pas absolue parce que les transmissions ne démarrent pas forcément au début de chaque slot (à la différence de TDMA, on peut transmettre plusieurs messages dans un slot). Cependant, si un nœud détecte une charge importante, il en informe ces voisins qui à leur tour informent les leurs. On passe ainsi à un mode de transmission selon lequel chacun de ces nœuds ne peut transmettre que pendant son slot. Ceci permet d'éviter les problèmes de collisions dues au problème du terminal caché qui influent énormément sur la performance du réseau lorsque la charge augmente.

Z-MAC se veut tolérant aux erreurs de synchronisation. Au début du déploiement, Z-MAC effectue une synchronisation globale de tous les nœuds, nécessaire pour le bon fonctionnement de l'ordonnancement. Ensuite, chaque nœud exécute en local un protocole de synchronisation à "faible-coût". Ce protocole s'inspire d'une technique utilisée dans RTP/RTCP. Chaque nœud transmet un message de synchronisation pour 100 messages de données transmis. Les performances de Z-MAC sont supérieures à celles de B-MAC pendant les moyennes et les hautes charges du réseau mais sont inférieures lorsque la charge est faible.

Méthodes d'accès au canal

CSMA vs TDMA

Un défi important dans les réseaux de capteurs sans fil est la gestion des collisions dues à un transfert de données simultané entre deux nœuds sur le même support.

Les protocoles de contrôle d'accès au support (MAC) ont été développés essentiellement pour essayer d'éviter ce genre de collisions en aidant les nœuds à décider quand et comment ils peuvent accéder au support. A ce propos, nous allons essayer de dégager les principales techniques d'accès au médium dans les réseaux de capteurs sans fil qui sont :

- TDMA (Time Division Multiple Access).
- CSMA (Carrier Sense Multiple Access).

Dans le cas des accès TDMA [67], [68], on affecte à chaque nœud un slot de temps durant lequel il peut envoyer ses données. Les relais aussi disposent de leur propre slot de temps. En effet, suivant la qualité du canal qui le lie avec un relais donné, la destination classe les relais suivant cette qualité et affecte les premiers slots aux meilleurs relais. Après la transmission des données par la source, chaque relais entend le canal. Quand le time slot d'un relais arrive et que personne n'a déjà relayé le paquet, le relais déduit que c'est lui le meilleur et qu'il doit relayer le paquet.

Dans le cas d'un accès CSMA [68], [69] toutes les étapes de la coopération se font par compétition au canal. Les relais estiment les qualités des liens qui les lient à la destination et/ou à la source, ensuite calculent un temporisateur proportionnel à ces qualités et entrent en compétition pour être élu comme relais.

Le relais ayant les meilleurs liens aura le temporisateur le plus court et accède en premier lieu au canal. Suite à cette contention, des collisions peuvent avoir lieu si les temporisateurs sont très rapprochés. Grâce à la connaissance du planning des voisins à deux sauts, il permet d'organiser les transmissions des nœuds et de réduire les collisions. Finalement, chaque fois qu'un nœud possède des données à envoyer, il informe ces voisins. Ensuite la décision de routage est prise localement suivant la disponibilité des ressources et des graphes de contention.

Une deuxième solution proposée pour diminuer ces collisions est d'utiliser une tonalité d'occupation du canal. La figure 3.2 représente cette solution. Après l'échange de RTS/CTS, le relais qui va émettre le paquet de confirmation du choix de relais envoie une tonalité d'occupation du canal. Quand les autres candidats entendent cette tonalité, ils annulent leurs envois programmés. La source commence par la suite la transmission des paquets de données (DATA1 sur la figure 3.2), le relais relaye le paquet (DATA2 sur la figure 3.2) et la destination finalise la communication par l'envoi d'un acquittement.

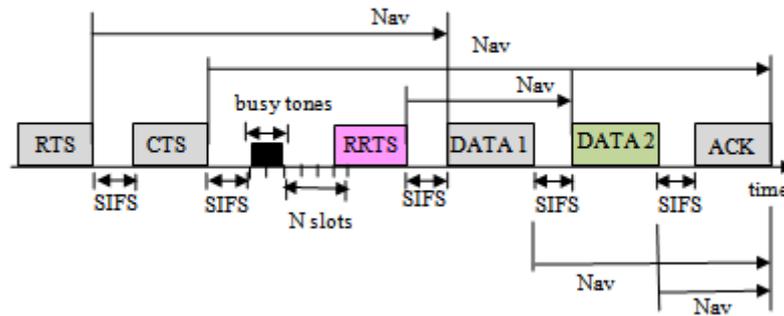


Figure 3.2 Méthode d'accès au canal CSMA.

Protocoles MAC avec gestion de la qualité de service dans les RCSF

Protocoles basés sur la différenciation de service

PSIFT [70] est un protocole MAC avec QoS conçu principalement pour les applications orientées événement (event-driven), il est basé sur le protocole SIFT, qui exploite la propriété de corrélation spatiale des réseaux de capteurs. PSIFT suppose que les R premiers des N rapports d'un événement détecté sont la partie la plus importante du message et doivent être transmises avec une faible latence. Ces R rapports seront suffisantes pour le nœud Sink afin d'identifier avec précision l'événement et éventuellement d'éliminer la redondance qui diminue à la fois la probabilité de collision. Les auteurs ont proposé deux méthodes pour supprimer les redondances inutiles "Explicit ACK" et "Implicit ACK". Ce protocole se base sur la méthode CSMA (Carrier Sense Multiple Access) et fournit une différenciation de trafic en modifiant l'espace inter-trame (IFS) et la taille de la fenêtre de contention (CW) de chaque classe de trafic (voir la figure 3.3).

Avantages et inconvénients: Bien que PSIFT pourrait être un choix judicieux pour les applications de type event-driven, il est presque impossible à être utiliser pour les autres types d'applications (Query-Driven, ...). Par ailleurs, l'élimination de la redondance peut aboutir à des données peu fiables. Le mécanisme de suppression des Rapports diminue la charge de trafic dans le réseau, cet avantage du PSIFT doit être utilisé afin de minimiser la consommation d'énergie du réseau.

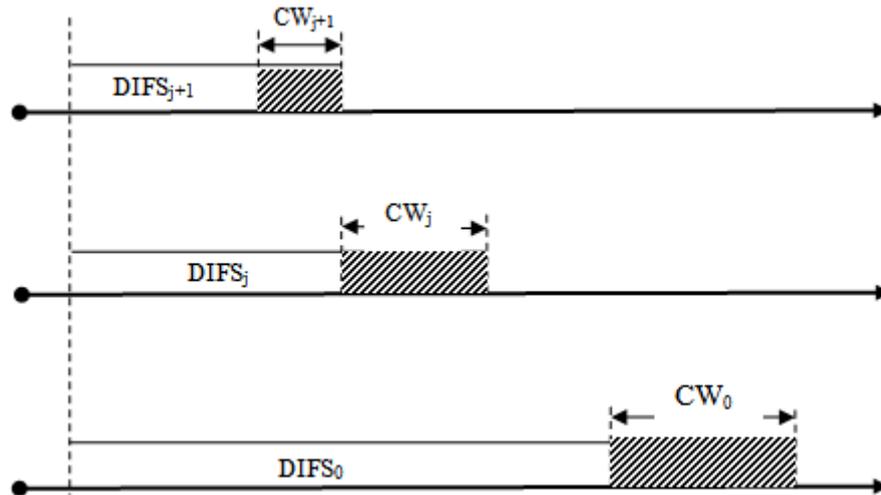


Figure 3.3 La différenciation de service dans PSIFT.

Le protocole (Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol) proposé par Saxena et al. Dans [71] vise à améliorer la qualité de service des transmissions multimédia dans les RCSF et d'économiser l'énergie sans violer les contraintes de QoS. Ce protocole utilise l'approche CSMA / CA et assure trois types de trafic dans le réseau: le streaming vidéo, trafic non temps réel et best effort.

Fondamentalement, ce protocole permet de surveiller périodiquement le mouvement des nœuds capteurs et le médium, collecter des statistiques sur le réseau tels que : les transmissions échouées, le type de trafic transmis. En conséquence, le protocole mis à jour la taille de la CW et la durée de vie adaptative, en se basant sur les informations collectées.

Avantages et inconvénients: Le fonctionnement très dynamique du protocole s'adapte bien aux changements de la topologie du réseau, mais aussi il introduit une surcharge et complexité importante.

PR-MAC [72] consiste à attribuer des priorités différentes pour chaque type d'événement surveillé par les nœuds capteurs et offrir une différenciation de service pour ces événements par la variation de la taille de la CW et IFS pour chacun d'entre eux. Le nœud émetteur transmet une petite impulsion pour la réservation du support physique et pour échanger les RTS-CTS. Par conséquent, les collisions peuvent se produire pendant la transmission dans le cas des nœuds possédant des priorités identiques. Le mécanisme d'acquittement est achevé par la diffusion des signaux par le nœud Sink vers tous les nœuds du réseau. En outre, les acquittements au sens inverse ne sont pas implémentés.

Avantages et inconvénients: le mécanisme d'acquittements utilisé par le nœud du Sink nécessite un nœud Sink très puissant en énergie ce qui semble non pratique. En outre, l'absence des acquittements entre les nœuds capteurs provoque la non fiabilité du protocole. PR-MAC effectue une réservation du médium sans échanger les messages RTS-CTS, ce qui réduit le trafic de contrôle.

RL-MAC [73] est un protocole MAC inspiré de S-MAC et qui utilise la technique d'apprentissage par renforcement afin de déterminer la meilleure taille de la période active. Pour un nœud donné, l'adaptation de la taille de la période active se base sur les observations des paquets correctement reçus et transmis par lui ainsi que le nombre d'échecs de transmission de ses voisins. Ainsi, l'objectif est de minimiser la consommation d'énergie et le nombre de paquets perdus à cause du problème de sommeil trop précoce ("early sleeping"). RL-MAC implémente trois classes de trafic. La différenciation entre eux se fait en variant la taille de la CW pour chaque type de trafic [24].

L'avantage de RL-MAC est l'adaptation de la période d'activité en fonction du trafic. Cependant, la complexité de l'algorithme d'adaptation peut constituer un handicap pour son implémentation sur les capteurs sans fil.

Le protocole **Q-MAC** [24], [74] utilise l'ordonnancement local (intra-nœud) pour sélectionner le prochain paquet à transmettre et un ordonnancement inter-nœud pour arbitrer l'accès au canal de transmission. Le protocole adopte un système multi-files d'attentes (cinq files) pour classifier les paquets selon leur priorité et se base sur les algorithmes MAX-MIN équitable et PGPS pour la sélection du prochain paquet à servir. La classification se fait selon la priorité du paquet du point de vue application, le nombre de sauts traversés, l'énergie restante du nœud et la charge pondérée de la queue. L'ordonnancement inter-nœud utilise un protocole d'accès aléatoire avec une gestion souple de la priorité (en anglais "Loosely Prioritized Random Access"). Le temps est divisé en parties actives et parties inactives avec un rapport cyclique fixe, comme dans S-MAC. La partie active est divisée en trames. Une trame représente un échange RTS-CTS-DATA-ACK et consiste en une période de contention (PC) et une période de transmission (PT). Durant la PC les nœuds ayant des données à transmettre essaient d'établir un échange RTS-CTS afin de réserver le canal, i.e. ils transmettent un message RTS et attendent la réception du CTS, le premier qui établit cet échange gagne l'accès au support. La PC est divisée en cinq sous périodes de contention, chacune attribuée à une priorité ; la première étant attribuée à la plus haute priorité. De cette façon les nœuds qui ont des messages plus urgents échangent des trames RTS-CTS les premiers. Le fonctionnement de Q-MAC suppose une synchronisation globale du réseau. De plus, l'utilisation d'un rapport cyclique fixe le rend peu adapté aux variations du volume et de la nature du trafic.

PQ-MAC [75] vise à utiliser les caractéristiques avantageuses des deux protocoles avec contention et ordonnancés et utilise un système hybride pour le partage du support. La synchronisation de l'horloge globale, la découverte des voisins et, par conséquent l'assignement des slots sont effectuées pendant la phase d'installation et suivi par la phase de transmission où la délivrance des données réelles a eu lieu.

Le protocole **QoMOR** [76] (A QoS-aware MAC protocol using Optimal Retransmission) utilise un mécanisme de retransmission optimale. Il est conçu pour les réseaux de capteurs intra-véhiculaire, Ce protocole assume que les nœuds capteurs n'ont que la capacité de

transmission e-i. Les nœuds capteurs ne peuvent recevoir aucun acquittement du nœud Sink et ne peuvent pas détecter les collisions.

Avantages et inconvénients: le coût réduit des nœuds capteurs, la transmission unidirectionnelle des données et l'absence de synchronisation entre les nœuds permettent au protocole QoMOR d'être une solution simple pour les réseaux de capteurs à un seul saut. Cependant, il est très difficile d'atteindre un niveau acceptable de probabilité de délivrance de trames avec des délais minimaux pour des réseaux denses et cet objectif devient plus difficile lorsque la taille des trames est grande.

I-MAC [77] utilise un schéma hybride TDMA / CSMA pour l'accès au médium. Il existe deux phases pendant l'exécution : la phase d'initialisation dans laquelle la découverte des voisins, l'affectation des slots, la synchronisation globale se produisent, et la phase de transmission, pendant laquelle le temps est divisé en slots. Ce protocole propose trois niveaux de priorité prédéfinis attribués à chaque nœud capteur en fonction de son rôle dans le réseau. I-MAC utilise des priorités dynamiques où les nœuds capteurs définissent leur niveau de priorité en fonction de leurs propres observations locales telles que : la charge de trafic, l'énergie restante et la distance vers le nœud Sink. Les auteurs proposent un algorithme d'ordonnancement appelé DNIB dont lequel les slots de temps sont attribués à chaque nœud capteur en se basant sur cet algorithme. Le nœud propriétaire du slot de temps a garanti l'accès à cet emplacement par l'emploi de l'AIFS (Arbitration Interframe Space). Si le nœud propriétaire n'a pas des données à envoyer et si le slot est libre les autres nœuds non propriétaires peuvent transmettre leurs données. La différenciation de service entre les nœuds non-propriétaires est assurée, en adoptant différentes tailles de CW pour chaque niveau de priorité.

Avantages et inconvénients: Malgré que le protocole I-MAC combine les points forts des deux schémas TDMA et CSMA, mais il reste toujours faible dans la synchroniser l'horloge qui est un inconvénient fameux de l'approche TDMA. Cependant la mise à jour des informations de voisinage, l'attribution des slots de temps dans un réseau de capteurs très dynamique est un défi majeur.

Diff-MAC [78] est un protocole MAC avec QoS et avec différenciation de service. Il est basé sur la méthode d'accès au canal CSMA / CA. Diff-MAC vise à améliorer l'utilisation du canal par l'utilisation des mécanismes efficaces de différenciation de services tout en fournissant une délivrance équitable et rapide des données. Diff-MAC est appliqué principalement dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil multimédia qui transportent souvent un trafic hétérogène.

Diff-MAC repose sur quelques caractéristiques fondamentales pour fournir de la qualité de service:

- La fragmentation et la transmission des messages sous forme de fragments (trames) ce qui permet de réduire le coût de la retransmission en cas de défaillance au niveau de la couche MAC.
- Diff-MAC est capable de régler sa taille de CW selon les exigences du trafic afin de réduire le nombre de collisions et diminuer le délai de bout-en-bout.
- Diff-MAC adapte la durée de vie des nœuds capteurs avec la classe de trafic dominante et tente à équilibrer la consommation d'énergie et le délai.

Avantages et inconvénients: Le protocole Diff-MAC est utilisé dans le cas des applications multimédias parce qu'il s'adapte rapidement aux changements des conditions du réseau. Cependant, le suivi des statistiques d'un réseau dynamique est une opération complexe.

Protocoles spécifiques à l'application

EQoSA [79] est un protocole MAC hybride conçu principalement pour supporter la QoS pour la transmission des vidéos et des images dans les réseaux de capteurs. Fondamentalement, EQoSA utilise des sessions avec des tailles dynamiques en ce basant sur le nombre des nœuds capteurs actifs et leurs charges de trafic. Durant la période de contention, chaque nœud indique s'il a des données à transmettre ou non.

Avantages et inconvénients: EQoSA souffre du problème traditionnel de synchronisation du temps de l'approche TDMA. En outre, il a besoin de cluster-head très puissant au sein du réseau de capteurs pour réaliser la répartition des slots de temps.

Le protocole proposé par Suriyachai et al. Dans [80] fournit un support de qualité de service en donnant des bornes déterministes de délai et de fiabilité pour chaque nœud, ce protocole présente une bonne solution pour les applications nécessitant des garanties du délai et de la fiabilité. Cette approche est basé sur un schéma TDMA sans collision. La consommation d'énergie est optimisée par l'emploi de différents cycles de vie pour chaque nœud capteur.

Avantages et inconvénients: Suriyachai et al. MAC n'est pas extensible pour les réseaux à grande échelle. En outre, même s'il peut minimiser le délai et assurer la fiabilité, il est impossible d'obtenir des bonnes performances de débit à cause de la réservation de toute une période pour un transfert de données unique.

Protocoles avec support de QoS indirect

Dans les sections précédentes nous avons présenté une variété de protocoles Mac avec gestion de qualité de service. Dans cette partie une autre famille qui est celle des protocoles avec gestion de qualité de service indirect (e.i fournir une qualité de service n'est pas leurs

principal objectif) est introduite. La plus part de ces protocoles s'adaptent aux conditions du réseau courant et offre des meilleures performances de qualité de service.

WiseMac [61] est basé sur CSMA non persistant et utilise une technique appelée "échantillonnage de préambule" pour minimiser la consommation d'énergie causée par l'écoute du canal ("idle" listening). La technique d'échantillonnage de préambule est sensiblement identique à celle de l'écoute à faible puissance utilisée par B-MAC. Les deux techniques ont été développées relativement au même moment. WiseMAC propose une amélioration de cette technique qui consiste à apprendre les temps de réveil des nœuds voisins. Ceci permet d'utiliser un préambule de plus courte durée, transmise juste avant le début de l'écoute du canal du nœud récepteur. Cette optimisation améliore l'énergie consommée pour la transmission d'un paquet ainsi que le débit maximal du réseau. Les informations de synchronisation sont envoyées dans les acquittements, WiseMAC suppose que toutes les transmissions sont acquittées.

Le mécanisme de synchronisation introduit un risque de collision systématique, dans le cas où plusieurs nœuds envoient régulièrement des paquets au même récepteur. Pour pallier ce problème, les auteurs proposent un mécanisme de réservation basé sur la longueur du préambule. Les nœuds choisissent une taille variable du préambule à transmettre avant le réveil du récepteur. Ainsi, le nœud ayant le plus long préambule gagnera l'accès au support et transmettra ses données le premier. WiseMAC utilise aussi un bit "encore" dans ces paquets afin d'informer le récepteur s'il y a encore des paquets à lui transmettre par le même émetteur. Ceci permet d'éviter que le récepteur ne se rendorme dès la réception du premier paquet et d'envoyer ainsi un burst de données à un même récepteur en utilisant un seul préambule.

I-EDF [81], [24] est un protocole MAC qui offre des garanties temps réel dures en termes de délai de bout-en-bout. Le protocole adopte une structure cellulaire du réseau où chaque cellule est assimilée à un hexagone et utilise une fréquence différente de celles de ses voisins. Dans I-EDF, le temps est divisé en trames et tous les nœuds du réseau sont synchronisés. L'accès au canal pour les nœuds appartenant à une même cellule se fait selon l'ordonnement EDF; le paquet ayant la plus courte échéance est transmis le premier. Cela suppose que tous ces nœuds connaissent à tout moment les paquets et leurs échéances qui seront transmis à l'intérieur d'une cellule, ce qui est possible puisque les auteurs supposent que le trafic échangé est ou bien périodique ou bien apériodique mais une période de génération minimale connue. Un routeur est placé au milieu de chaque cellule pour assurer la communication inter-cellulaire. Il est capable d'émettre et de recevoir sur des fréquences différentes au même temps (utilisation de deux transceivers). Des trames prédéfinies sont allouées à ces routeurs pour assurer la communication. Dans chaque trame le routeur transmet sur la fréquence du prochain saut. Notons que tous les routeurs transmettent sur une des six directions possibles, définies par l'hexagone, et changent de direction d'une façon cyclique. I-EDF suppose un déploiement hexagonal et précis du réseau ainsi qu'une synchronisation globale de tout le réseau afin d'offrir des garanties temps réel. Ces restrictions

supplémentaires limitent son champ d'application. I-EDF n'a pas de considération pour la consommation d'énergie.

LWT-MAC [82] répond efficacement aux changements sporadiques des réseaux de capteurs. Jiang et al. Propose un algorithme flou (fuzzy algorithm) dont l'objectif est de réduire le taux d'erreur de données, et de prolonger la durée de vie du réseau par l'ajustement de l'énergie de transmission des nœuds capteurs.

Lump [83] est un protocole qui fonctionne entre la couche liaison et la couche réseau. Il peut être considéré comme un protocole MAC. Lump utilise le mécanisme d'agrégation de données pour fournir la QoS. Le but de ce protocole est de réduire les communications radio et de minimiser la consommation d'énergie.

QBCDCP [84] supporte la transmission des vidéos et des images par l'utilisation de la technique de clustering dynamique et fournit des garanties de délai et de bande passante. LMAC [85] est un protocole MAC basé sur TDMA. Le temps est divisé en trames, elles même divisées en slots. Chaque nœud se verra assigner un slot pendant lequel il peut transmettre un paquet de données. Pendant son slot, un nœud transmet un message de contrôle suivi éventuellement d'un paquet de donnée s'il en a un à transmettre. Tous les nœuds doivent se réveiller au début du slot pour recevoir le message de contrôle. Seul le destinataire reste actif pour recevoir le paquet de données par la suite (ils se rendorment tous s'il n'y a rien à transmettre). L'émetteur et le récepteur se rendorment à la fin de la transmission du paquet. L'ordonnancement des slot se fait d'une façon distribuée. La synchronisation s'effectue pas-à-pas en commençant par le coordinateur du réseau. Les deux opérations se font simultanément au démarrage du réseau comme suit. Le coordinateur démarre le réseau et choisit un slot. Pendant son slot il va transmettre son message de contrôle à tous ses voisins permettant à la fois de les synchroniser et de les informer de l'ensemble des slots libres. Les voisins vont donc se synchroniser puis ils vont choisir à leur tour un slot libre au hasard. Ces nœuds transmettent leurs messages de contrôle pendant la trame suivante, indiquant aussi la liste des slots libres. Si deux voisins choisissent le même slot, les nœuds voisins ont la responsabilité de les informer. L'opération se poursuit après d'une manière incrémentale jusqu'à ce que tous les nœuds soient synchronisés et un slot soit réservé par chacun d'entre eux. Notons qu'un nœud ne gagne le contrôle d'un slot qu'après la consultation des slots libres de tous ses voisins. Le nombre total des slots à réserver est fixé dès le départ.

Comparaison des différents protocoles MAC avec gestion de la QoS

Dans le tableau 3.2, nous avons résumé les aspects généraux de tous les protocoles Mac avec gestion de QoS discutés dans les sections précédentes :

Protocole	Type	Diff. de service	Assignement de priorité	L'adaptation du trafic	Synch	Sensibilisation à l'énergie	Complexité	Scalabilité
PSIFT	CSMA	✓	Dynamique	Non	Non	Non	Réduite	Bien
Saxena et al. MAC	CSMA	✓	Statique	Oui	Non	Oui	Elevée	Bien
PR-MAC	CSMA	✓	Statique	Non	Non	Non	Réduite	Faible
RL-MAC	CSMA	✓	Statique	Oui	Non	Oui	Elevée	Bien
Q-MAC	CSMA	✓	Hybride	Non	Non	Oui	Moyenne	Bien
PQ-MAC	TDMA /CSMA	✓	Statique	Non	Local	Oui	Elevée	Faible
QoMOR	ALOHA	✓	Statique	Non	Non	Non	Réduite	Faible
I-MAC	TDMA /CSMA	✓	Dynamique	Oui	Local	Non	moyenne	Faible
Diff-MAC	TDMA /CSMA	✓	hybride	Oui	Non	Oui	Elevée	Bien
EQoSA	TDMA /CSMA	-	-	Oui	Local	Oui	moyenne	Faible
Suriyachi et al. MAC	TDMA	-	-	Non	Réseau étendu	Oui	Moyenne	Faible

Tableau 3.2 Comparaison des protocoles MAC avec gestion de QoS.

Le schéma ci-dessous est un résumé général des différentes familles des protocoles MAC avec gestion de QoS :

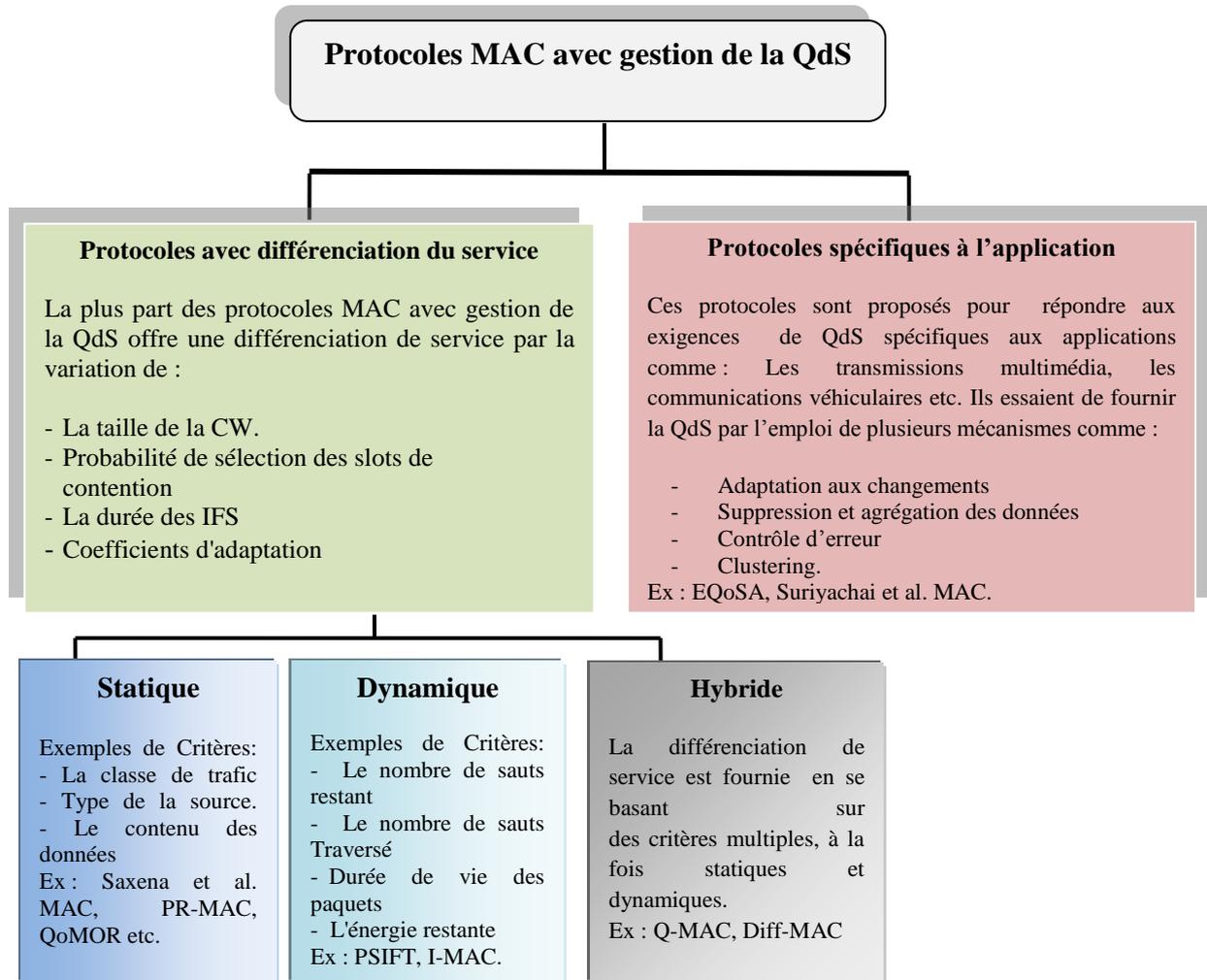


Figure 3.4 Classification des protocoles MAC avec gestion de la QoS.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les exigences de QoS imposées par les principales applications des réseaux de capteurs, et nous avons affirmé que la notion de QoS de bout-en-bout utilisée dans les réseaux traditionnels peut ne pas être suffisante dans les RCSF, nous avons listé les principaux défis de qualité de service posés par les caractéristiques des réseaux de capteurs et de faire un état de l'art sur les protocoles des couches : transport, Réseau, MAC, qui se trouvent dans la littérature traitant de tels sujets.

Cependant, toutes ces solutions sont basées et conçues selon le paradigme de « l'architecture en couche » : chaque couche fonctionne indépendamment par rapport aux autres : par conséquent elles sont conçues et optimisées séparément. Il en va de même pour les mécanismes de QoS proposés.

Une approche coopérative où l'adaptation est coordonnée entre les différentes couches d'une plateforme, est appelée Cross-Layer, afin d'exploiter la pleine connaissance du statut de réseau rassemblé à différentes couches. Ces couches peuvent être adjacentes, ou même non adjacentes dans la pile protocolaire. Cette approche, par définition, viole le concept strict des modèles OSI et Internet en couches.

Le chapitre suivant présente en détail l'approche Cross-Layer avec les différents types d'architectures à communication cross-layer existantes.

Chapitre 4
Architecture Cross-Layer dans
les RCSF

4.1 Introduction

Dans le modèle de couche OSI, le rôle de chaque couche est d'offrir des services à la couche supérieure adjacente. L'intérêt de ce modèle de communication est de garder une transparence pour éviter que les couches supérieures connaissent le détail des autres couches inférieures. Toutes les communications doivent s'effectuer à travers des interfaces prédéfinies par le protocole utilisé dans chaque couche. Ceci a donné comme résultats, une facilité de standardisation des protocoles de communication, une aisance dans le développement de nouveaux protocoles de toutes les couches, en plus de l'interopérabilité entre différents réseaux et équipements. Malgré tous ces avantages, ce modèle n'est pas très flexible, car les communications s'effectuent de manière stricte et prédéfinie. Cela peut mener dans certains cas à une utilisation moins efficace des ressources du réseau, et par conséquent, à une dégradation de la qualité de service, notamment dans les environnements dynamiques. Ceci a motivé des chercheurs à adopter le modèle de cross-layer [86]. Les solutions par adaptation et coopération cross-layer cherchent à augmenter les performances globales des communications de bout en bout du système pour répondre aux besoins de QoS des utilisateurs. L'objectif est d'améliorer les performances en exploitant l'interaction entre les couches des différents niveaux du modèle OSI [53].

Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche cross-layer, on décrit brièvement les objectifs du concept cross-layer dans les RCSF. Nous abordons, par la suite les trois architectures cross-layer existantes et on termine par l'énumération des protocoles Cross-layer avec QoS pour les RCSF.

4.2 Concept Cross-Layer

La conception Cross-Layer se réfère à la conception de protocole en exploitant activement les dépendances entre les couches afin d'obtenir des gains de performance : une couche se base sur certains détails de conception d'une autre couche. Ces couches peuvent être adjacentes, ou même non adjacentes dans la pile protocolaire [87].

L'approche cross-layer peut être vue comme une approche coopérative où l'adaptation est coordonnée entre les couches multiples du système de communication. En adoptant le concept Cross-Layer, on perd le luxe d'une conception simple et indépendante des protocoles.

En résumé, la flexibilité de l'approche Cross-Layer aide à améliorer les performances de communication de bout en bout. Cependant, l'approche Cross-Layer peut augmenter de manière significative la complexité de conception. En effet, le système de protocoles en couches permet aux concepteurs de pouvoir facilement optimiser une couche sans avoir à faire face à la complexité et l'expertise associé des autres couches [87].

Principalement, on distingue quatre classes de communication Cross-Layer:

- Communication upward: les couches supérieures requièrent des informations provenant des couches inférieures.
- Communication downward: les couches supérieures fournissent des paramètres de configuration aux couches inférieures.
- Communication bidirectionnelle: deux couches différentes peuvent collaborer entre elles en échangeant des informations.
- Communication entre les couches adjacentes: plusieurs couches adjacentes sont conçues ensemble pour former une « super couche ». Ainsi, le service fourni par cette super couche est la collection des services fournis par ces couches adjacentes.

4.3 Importance de l'approche inter-couches (Cross-Layer) dans les RCSF

Les exigences rigoureuses des réseaux de capteurs poussent de plus en plus vers la conception des solutions sous une architecture inter-couches. En effet, afin d'atteindre les performances souhaitées sous multiples contraintes (QoS, énergie, distorsion, sécurité, ...), les protocoles et les algorithmes des couches MAC, réseau, transport et application sont amenés à fonctionner d'une manière encore plus interactive. Dans un tel contexte, chaque couche est consciente de l'importance des données en cours de traitement pour l'ensemble du système.

Les approches basées sur le concept du Cross-layer permettent généralement d'obtenir de meilleures performances par rapport aux approches qui respectent la notion d'abstraction des couches définie dans le modèle OSI [88]. Cependant, ces approches sont généralement plus complexes à mettre en œuvre et sont généralement moins compatibles avec les protocoles et normes existants et peuvent être, ainsi difficilement réutilisable. Cela donne naissance à un compromis entre performance et interopérabilité.

4.4 Les Types d'architecture Cross-Layer

Il est possible de classer les possibilités d'architectures Cross-Layer en trois catégories : Architecture Cross-layer à base de communication directe, architecture Cross-layer à base de communication indirecte et architecture Cross-layer à base de nouvelles abstractions [87].

4.4.1 Architecture Cross-layer à base de communication directe

Cette architecture permet aux couches, même si elles ne sont pas adjacentes, de communiquer directement entre elles (voir la Figure 4.1), afin d'optimiser la QoS par exemple. Pour cela, il est nécessaire de créer des nouvelles interfaces, d'intégrer des nouvelles routines aux couches qui leurs permettront la réception et le traitement des données Cross-Layer. Cependant, il faut noter que le nombre de routines à implémenter sera variable selon le nombre de protocoles à satisfaire. De plus, cette méthode ajoute un certain nombre de contraintes telles que le ralentissement de l'exécution du code puisque le code Cross-Layer a été ajouté, par conséquent une mise à jour difficile à maintenir.

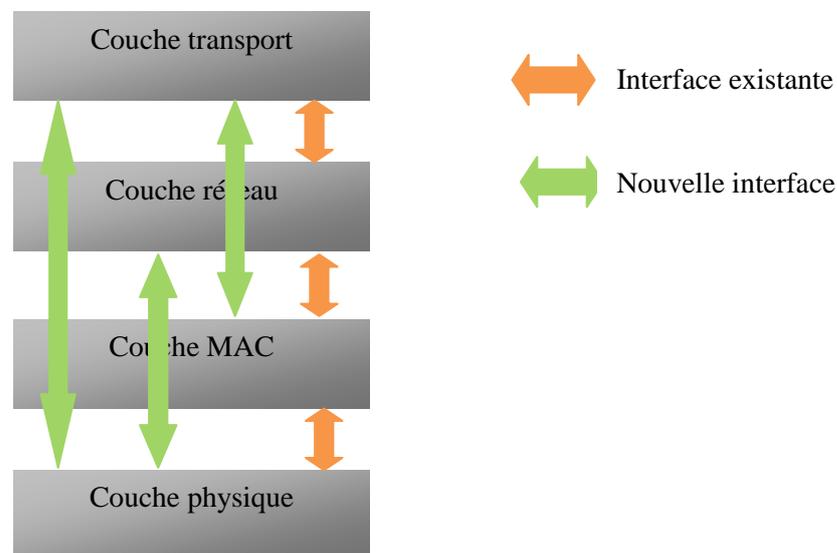


Figure 4.1 Architecture Cross-layer à base de communication directe.

4.4.2 Architecture Cross-layer à base de communication indirecte

Une deuxième catégorie permet les interactions inter-couches via une entité intermédiaire commune (voir Figure 4.2). Cette architecture permet de conserver le fonctionnement normal de la pile protocolaire, d'où une compatibilité avec l'architecture classique en couches. Cela permet donc de maintenir tous les avantages inhérents à une architecture modulaire en couches isolées, tels que la robustesse ou la facilité d'évolutivité. De plus, cette méthode permet une évolution continue de l'entité cross layer, par ajout ou suppression de protocoles.

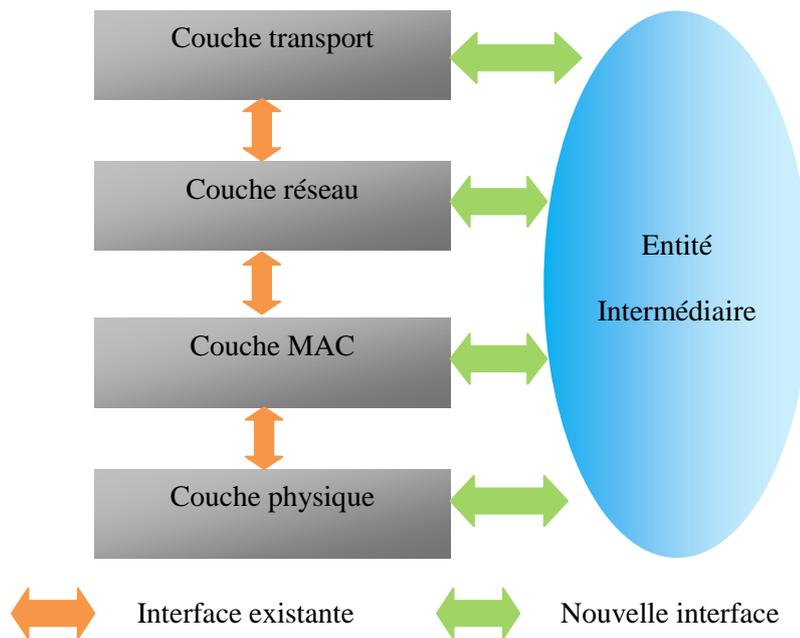


Figure 4.2 Architecture Cross-layer à base de communication indirecte.

4.4.3 Architecture Cross-layer à base de nouvelles abstractions

Une troisième catégorie s'abstrait complètement du modèle en couche (voir. Figure 4.3), elle est donc bien plus flexible mais elle viole complètement les préceptes du modèle en couches. Dans cette approche le concept d'architecture en couches est totalement abandonné, puisque plusieurs couches peuvent être couplées ensemble afin de construire une sorte de super couche, qui peut gérer différentes tâches dans le réseau. Cette nouvelle approche Cross-layer permet d'offrir une forte flexibilité avec un minimum de problèmes.

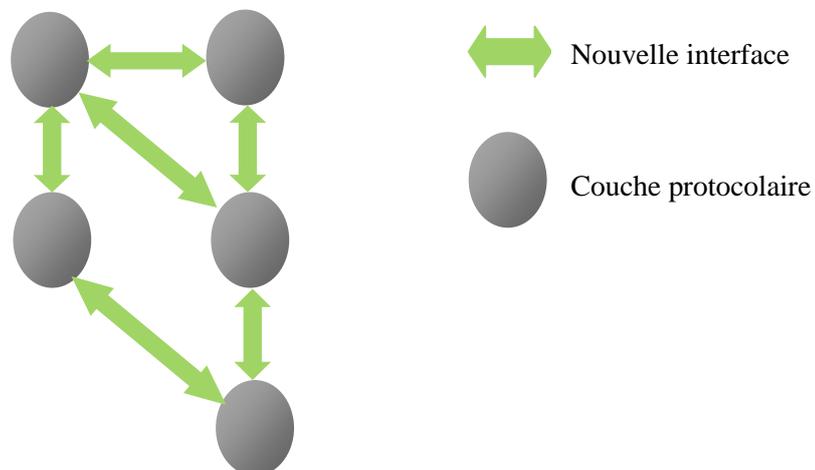


Figure 4.3 Architecture à base de nouvelles abstractions.

4.5 Protocoles Cross-layer avec QoS pour les RCSF

Les RCSF restent un cas particulier de réseaux, parce que leur fiabilité implique non seulement la simple livraison de données, mais aussi leur capacité de détecter les informations à transmettre (des paramètres physiques par exemple). Pour accomplir ces tâches, il existe un fort besoin de coopération entre les différentes couches (physique, réseau, etc.) ainsi qu'une bonne couverture de la zone surveillée.

Donc, l'intérêt d'adopter une stratégie de conception cross-layer pour les RCSF est presque évident, sans oublier que cette conception doit se réaliser avec beaucoup d'attention.

Certains travaux de recherche ayant adopté le concept Cross-layer afin d'améliorer les performances du réseau de capteur sans fil de bout en bout pour répondre aux besoins de QoS des applications [89].

Dans cette section, on s'intéresse aux protocoles cross-Layer qui proposent des améliorations afin d'assurer une meilleur QoS.

4.5.1 Le protocole QUATTRO

Le protocole QUATTRO (QUALity-of-service-capable clusTer-based Time-shared ROuting-assisted MAC protocol) [90], [91] combine les fonctionnalités des protocoles de routage et des protocoles MAC. Il se base sur les fonctions suivantes:

1. Découverte de route et l'attribution d'une valeur pour chaque route.
2. Sélection de la route et réservation des ressources le long du chemin.
3. Formation des clusters et collecte des informations sur les interférences des clusters.
4. L'assignement de la fenêtre de contention pour chaque cluster pour éviter les interférences.
5. La reconfiguration

La clé pour garantir les exigences de qualité de service est la sélection de la route satisfaisante les ressources nécessaires. L'utilisation des mécanismes d'évitement de collisions et la meilleure utilisation des états des nœuds capteurs permettent de garantir de la QoS et d'économiser l'énergie.

A. La découverte de route

La première étape du protocole QUATTRO est la découverte d'un ensemble de routes entre chaque nœud capteur et le nœud Sink et l'affectation d'une valeur de pondération à chacune de ces routes. Cette procédure consiste en quatre phases brièvement expliquées :

l'algorithme fonctionne en utilisant les informations de mise à jour diffusées périodiquement par le nœud Sink appelées : RPRI dont le but de permettre à chaque nœud de découvrir la route primaire vers le Sink. Le format de ce message est présenté dans la figure 4.4 :

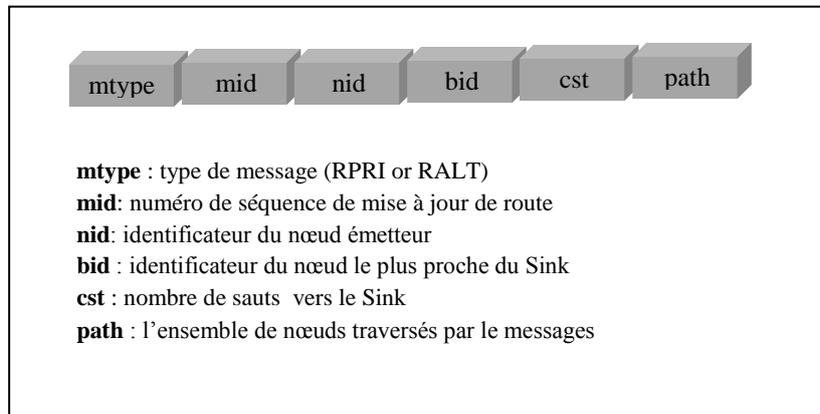


Figure 4.4 Format de message de découverte de route.

Lorsqu'un nœud reçoit un message de mise à jour pour la première fois, il marque le nœud émetteur du message comme étant un nœud père et rediffuse le message. Cela se poursuit de manière récursive jusqu'à la réception du message par tous les nœuds du réseau.

La deuxième phase consiste à transmettre un nouveau message de type : RALT ce message est généré par chaque nœud capteur pour informer ces voisins de l'ensemble des routes alternatives découvertes.

Dans la troisième phase, chaque nœud capteur enverra un message WPRB à travers chacune des routes découvertes. Lorsqu'un nœud capteur reçoit un de ces messages, il incrémentera le compteur du nombre de routes (num_routes) et retransmettra le message. Le nœud Sink quand il reçoit le message automatiquement il va mettre à jour table des routes.

Finalement, le nœud Sink envoie comme réponse un message WRSP à travers toutes les routes stockées dans la table de routage. La figure 4.5 montre le format des messages WPRB et WRSP. A la réception du message WRSP, le nœud va le retransmettre après avoir modifié le champ énergie du goulot d'étranglement avec sa propre valeur. De même, si la valeur de ce champ est supérieure à l'énergie restante, elle sera mise à son énergie disponible.

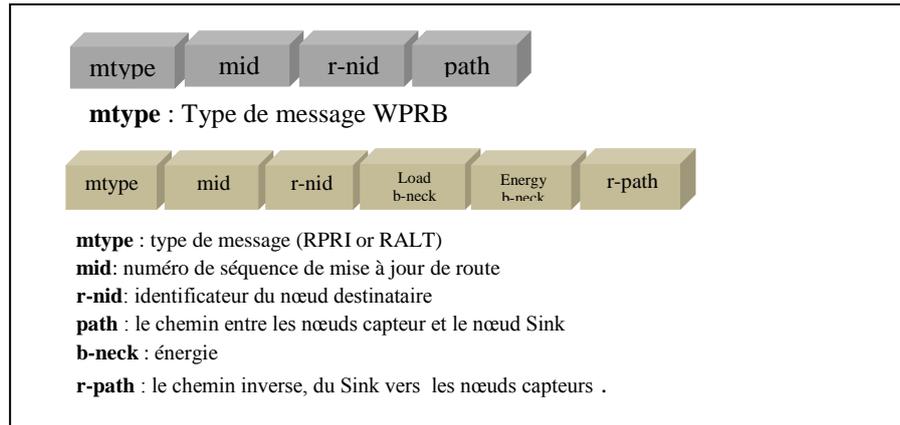


Figure 4.5 Format des messages WPRB et WRSP.

B. Sélection de la route et réservation des ressources

La deuxième étape est la réservation des ressources le long du chemin. Les routes sont réservées lien par lien. Lorsqu'un lien est réservé avec succès les nœuds deviennent des membres d'un cluster et le nœud qui accepte à transmettre le trafic devient le CH. Avant de commencer le processus de réservation le nœud Sink diffuse un message RSINT pour indiquer qu'il est temps pour commencer la phase de réservation. A la réception de ce message par les nœuds voisins, ils répondent à leurs tours par un message RSINT au Sink.

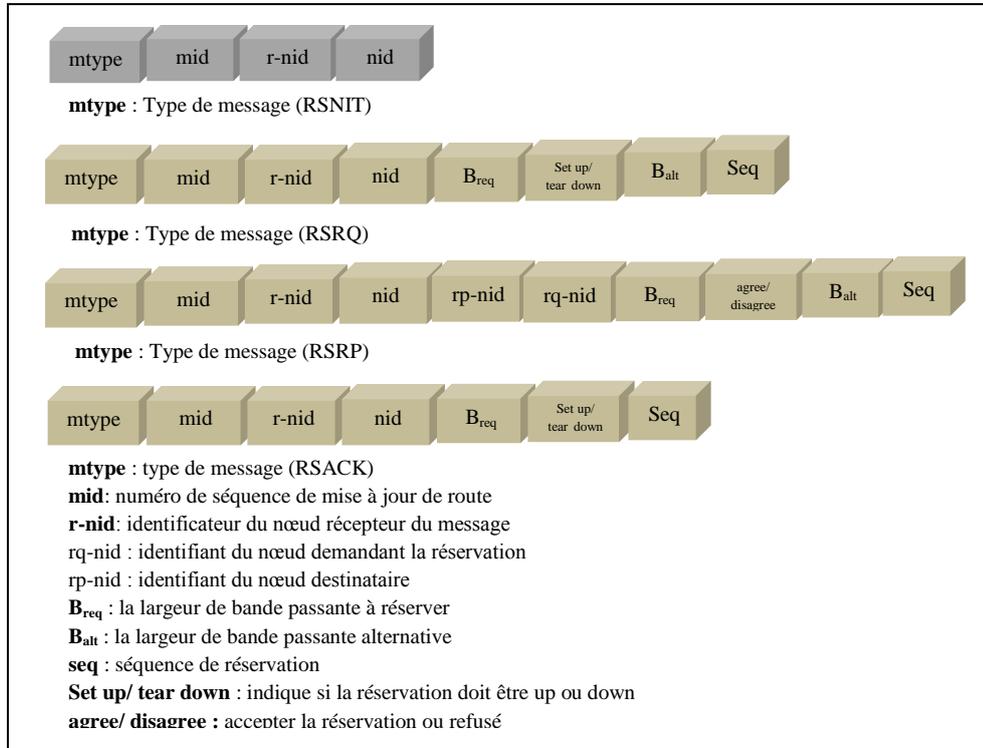


Figure 4.6 Format du message de réservation.

Comme le montre la figure 4.6, ce message contient les identificateurs de l'émetteur et du récepteur. Ensuite, le nœud choisit aléatoirement une de ses routes et enverra un message RSINT au nœud suivant.

La gestion de la bande passante sera comme suite. Tous les nœuds commencent avec une bande passante disponible égale à R (le taux de données réel transmises à travers le canal sans fil), cette valeur dépend de la couche physique et de la politique d'accès au support.

La Figure 4.7 montre une description du processus de réservation. En effet, un ensemble de messages de contrôles est utilisé afin de mettre en place la réservation de la bande passante: RSRQ, RSRP, et le message RSACK. Le message RSRQ peut être généré pour établir ou pour annuler une réservation. Le message, RSRP est utilisé pour envoyer une réponse positive ou négative. Enfin, le message RSACK est envoyé afin de confirmer la bonne réception de la réponse.

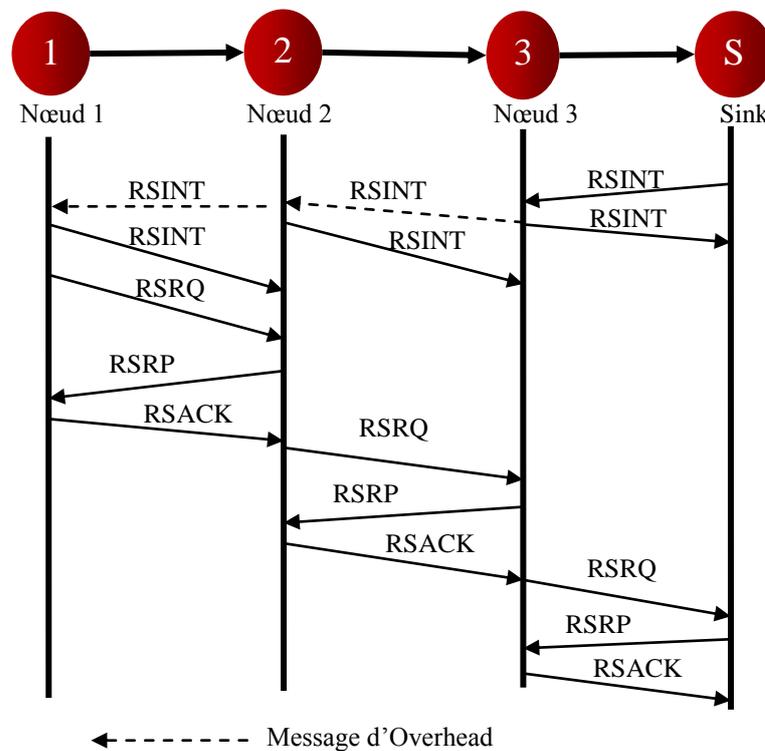


Figure 4.7 La phase de réservation.

C. Collecte des informations sur les interférences

Les informations relatives aux interférences entre des clusters voisins doivent être collectées pour permettre l'ordonnancement des temps de réveils des différents clusters afin d'éviter les chevauchements. Pour ce faire, à la fin de la phase de réservation de la route, le

nœud Sink diffuse un message CISTART (start of cluster-interference information collection) qui sera diffusé sur le réseau. Les nœuds feuilles doivent être les premiers qui commencent la collecte des informations d'interférences des clusters. Chacun de ces nœuds doit envoyer un message CIINFO à son CH qui contient la liste des clusters interférents. Quand le CH reçoit le message CIINFO de l'un de ses membres il mettra à jour la liste des clusters interférents détectés.

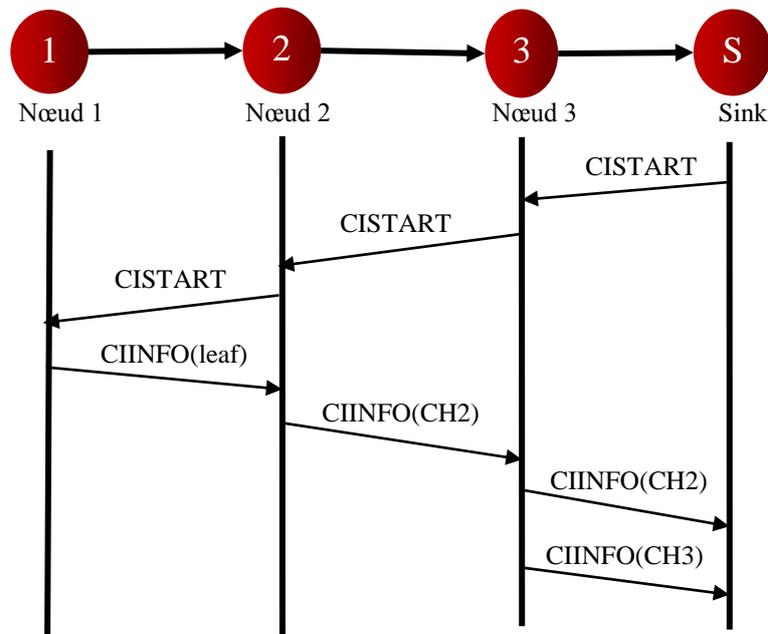


Figure 4.8 la phase de collecte des informations sur les interférences des clusters.

D. L'affectation de la fenêtre de contention

En se basant sur les informations collectées dans la phase précédente, le nœud Sink aura suffisamment d'informations pour assigner des fenêtres d'activités aux différents clusters de telle manière qu'ils n'interfèrent pas les uns avec les autres.

E. La reconfiguration

Le cluster Head (CH) peut consommer plus d'énergie parce qu'il doit être en réveil pendant deux fenêtres d'activités non seulement pour envoyer ses propres données collectées, mais en outre il doit transmettre celles des membres du cluster. Par conséquent, il faut faire une redistribution efficace de la consommation d'énergie.

4.5.2 Le protocole CL-MAC

Le protocole CL-MAC [98] fait partie de la classe des protocoles MAC fondés sur la notion d'inter-couches, faisant interagir par collaboration (non pas par fusion) les deux couches adjacentes : la couche réseau et la couche MAC. Son objectif primordial est l'efficacité énergétique. Il permet d'éliminer les principales causes de gaspillage d'énergie et de diminuer sensiblement la latence en présence d'applications particulières sensibles au délai de délivrance de données de bout en bout et pour les quelles le protocole CL-MAC peut être un candidat potentiel. Les applications sensibles au délai, lorsqu'un événement anormal aura lieu, existent en pratique : par exemple la détection de feu de forêt, détection d'intrus, assistance à des personnages âgés ou handicapés et surveillance à distance de la santé d'édifices publics, et surveillance à l'aide de capteurs vidéo d'une infrastructure importante. Dans ces applications, l'événement détecté est considéré comme un message urgent qui doit être transmis rapidement au Sink pour une intervention urgente. Afin de répondre aux exigences imposées sur le comportement du CL-MAC, il est nécessaire de réduire considérablement la latence au niveau MAC lorsqu'il s'agit de transmettre ce type de données urgentes depuis une source vers le Sink.

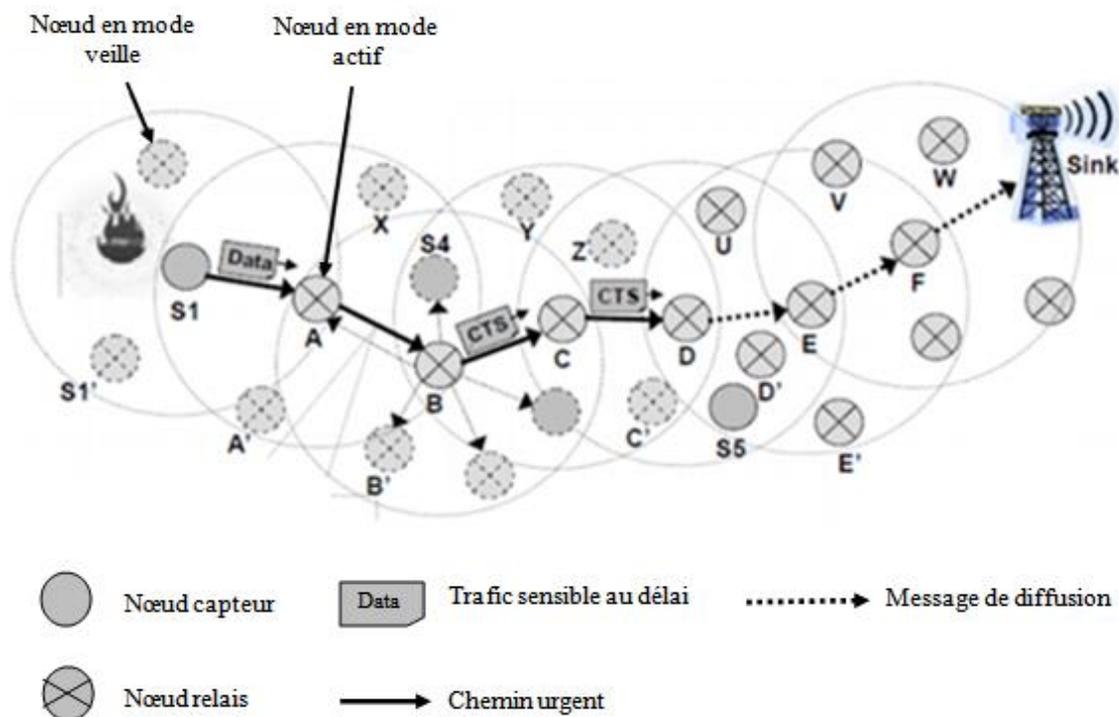


Figure 4.9 Modèle de fonctionnement du protocole CL-MAC.

La couche MAC assure l'accès au medium selon un calendrier à deux états par alternance veille/Réveil (Sleep/Weakup) adaptif identiquement au protocole T-MAC et les nœuds sont localement et périodiquement synchronisés comme c'est le cas du protocole Z-MAC. Les nœuds capteurs du réseau sont déployés aléatoirement dans une surface géométrique de forme linéaire ou sous forme de grille. La phase de synchronisation des nœuds suit celle du déploiement [99].

4.5.3 Autres protocoles Cross-layer avec QoS pour les RCSF

Le protocole TREN « Timely, Reliable, Energyefficient and Dynamic » [53], [92] est proposé pour les applications de contrôle industriel utilisant les RCSF. Les auteurs soutiennent l'approche basée sur les interactions complexes entre des protocoles de différentes couches du modèle OSI pour atteindre le maximum d'efficacité. Le protocole TREN permet la collaboration entre l'algorithme de routage, la couche MAC, et le contrôle de l'alimentation pour satisfaire la fiabilité et la latence désirées. Ceci est obtenu grâce à un processus d'optimisation avec un objectif de minimiser la consommation d'énergie. Dans ce protocole, le mécanisme de routage est divisé en routage statique pour manipuler les communications inter-clusters, et le routage dynamique, pour gérer les communications inter-nœuds. Le protocole de routage est associé à une couche MAC hybride TDMA/CSMA-CA.

Dans [93], les auteurs proposent l'algorithme ADAPT « ADaptive Access Parameters Tuning » comme étant un Framework Cross-Layer distribué pour les RCSF qui intègre les standards IEEE 802.15.4 et ZigBee. L'objectif de cet algorithme est d'assurer un maximum de fiabilité avec une communication efficiente en énergie. ADAPT emploie un module d'adaptation qui interagit directement avec toutes les couches de la pile ZigBee. Pour faciliter les interactions, ce module est réalisé sous la forme d'une composante verticale qui a un accès direct à chaque couche de la pile protocolaire. Les résultats de simulation ont montré que ce mécanisme donne de meilleures performances en termes de taux de délivrance de paquets et consommation d'énergie par message transmis [53].

Le protocole CLEEP (*Cross-Layer Energy-Efficient Protocol*) [94] introduit un nouveau concept qui consiste à proposer une stratégie Cross-layer basée sur l'interaction des couches Physique, Mac et Réseau. CLEEP obtient en premier temps l'énergie de transmission minimale entre deux nœuds, et maintient par la suite des tables de nœuds voisins au niveau de chaque nœud dans le réseau. Ces tables sont utilisées par la couche réseau afin de construire des chemins de routage économiques en énergie. De plus, le protocole CLEEP utilise les informations de routage de la couche réseau afin de déterminer le plan d'activation des nœuds capteurs au niveau de la couche Mac. Ainsi, la durée de mise en veille des nœuds capteurs peut être considérablement optimisée.

Les recherches proposées dans [95] présentent une architecture inter-couches (cross-layer) qui combine les performances des deux couches (MAC et réseau) afin d'optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Les nœuds capteurs génèrent un RTS contenant également les informations de destination finale et un CTS contenant l'adresse du nœud émetteur, de telle sorte, lorsque le temporisateur NAV du nœud expire seulement ce nœud se réveille et les autres restent en mode sommeil, ce qui mène à une efficacité énergétique.

Dans [96], [97] les auteurs ont proposé une unité de contrôle cross-layer (XLCU) pour fournir de la QoS dans les RCMSF. Ils ont pris en compte le transfert géographique pour contrôler les flux et les exigences de bout-en-bout de la QoS. De plus, le XLCU contrôle l'ordonnancement et l'assignement de la durée de l'impulsion radio UWB (TH-IR-UWB), pour éviter les collisions. Cette solution présente des meilleures performances en termes d'augmentation du débit et de la fiabilité et la réduction du délai de bout-en-bout.

Le protocole CREC (A cross-layer, reliable and efficient communication protocol) [98] implémente les fonctionnalités des trois fondamentaux paradigmes de communication qui sont : l'accès au support, le routage efficace et le contrôle de congestion. Cette solution permet d'améliorer les performances du réseau, d'économiser l'énergie et de réduire le délai de bout-en-bout.

4.6 Conclusion

Le design Cross-layer a prouvé son efficacité par rapport à l'approche classique en couches. L'application de ce nouveau concept dans les RCSF a engendré des gains de performances de communication de bout en bout, que ce soit au niveau de la gestion efficace des ressources (économie d'énergie) ou de la qualité de service. En effet, l'exploitation de l'interaction entre plusieurs couches protocolaires permet d'éliminer toute forme de redondance et de concevoir des protocoles robustes. Néanmoins, l'intégration de l'approche Cross-layer dans la conception des RCSF reste un domaine très récent. Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les solutions inter-couches récentes adressant la problématique de qualité de service dans les RCSF. Nous avons commencé d'abord par une description du concept cross-layer ainsi que ces différents types d'architectures. Finalement, nous avons listé quelques protocoles avec qualité de service basés sur une architecture cross-layer.

Le chapitre suivant sera dédié à la présentation de la première solution que nous proposons dans le cadre d'assurer la qualité de service dans les RCSF, qui consiste en un protocole de communication avec différenciation de service pour supporter de la QoS.

Partie 2 : Contributions

Chapitre 5
Protocole avec différenciation de
service pour une QoS pour les RCSF
(QoS-HEEP)

5.1 Introduction

Précédemment, nous avons présenté un état de l'art sur les différents protocoles de communication basés sur la qualité de service et dédiés aux différents types de réseaux (réseaux filaires, Ad hoc et réseaux de capteurs sans fil). Ces dernières années, la recherche dans ce domaine fut très fructueuse avec de nombreuses propositions et améliorations de ces protocoles. Cependant, dans certaines applications, ces protocoles ne répondent pas à toutes les exigences et attentes. Par ailleurs, la recherche dans les réseaux de capteurs est ouverte pour de nouvelles idées afin d'optimiser encore les protocoles existants pour obtenir des meilleures performances.

Dans ce chapitre nous présenterons notre première contribution de recherche dans le domaine de qualité de service. La solution propose un nouveau protocole de communication avec Qualité de service nommé QoS-HEEP (Hybrid Energy Efficient Protocol with Quality of Service for WSN), basé sur le mécanisme de différenciation de service afin de faire la distinction entre les deux types de trafics, trafic temps réel et non temps réel. Le protocole proposé est une extension du protocole HEEP, tout en garantissant une qualité de service pour le trafic temps réel avec une haute priorité qui se distingue du trafic non-temps réel qui est d'une basse priorité. Ainsi, le trafic entrant est servi en fonction de sa priorité.

Ce chapitre est organisé comme suit: les deux premières sections étudient respectivement le concept de base du protocole HEEP ainsi que le mécanisme de différenciation de service. La section 5.4 décrit le protocole QoS-HEEP, bien que l'évaluation des performances et les résultats expérimentaux sont discutés dans la section 5.5.

5.2 Concept de base du protocole HEEP

Le protocole HEEP combine les avantages des deux approches (approche basée cluster utilisée par le protocole LEACH [99], [100] et approche basée chaîne du protocole PEGASIS [101]). L'organisation des nœuds appartenant au même Cluster sous forme d'une chaîne permet d'améliorer et de réguler la dissipation de l'énergie et par conséquent de réduire la charge sur le CH (cluster-head). En effet, les nœuds communiquent uniquement avec leurs proches voisins et non pas directement avec leur CH ce qui permet d'économiser de l'énergie et d'offrir une meilleure utilisation de la largeur de la bande. L'agrégation des données au niveau de chaque nœud dans la chaîne réduit la quantité de données échangées entre les nœuds et leur CH, ce qui a pour effet de préserver les réserves d'énergie de ces derniers. Quant à lui agrège les données reçues avec les siennes et les transmet à son autre voisin jusqu'à atteindre le CH qui les transmet directement à la BS ou en utilisant l'approche multi sauts pour préserver d'avantage d'énergie. Autrement dit, dans cette nouvelle organisation

(grappe à chaînes), tous les nœuds du cluster transmettent leurs données collectées à leurs CHs respectifs en se reliant à travers la chaîne, tandis que chaque CH doit recevoir les données collectées des nœuds entêtés de la chaîne [102].

A l'inverse de LEACH, le nombre de nœuds qui communiquent avec le CH est considérablement réduit. Ceci implique une meilleure économie d'énergie et prolonge le temps de vie des CHs, car si ces derniers meurent (épuisent leur réserve d'énergie), tous les nœuds du cluster vont perdre leur pouvoir de communication avec la BS et par conséquent le cluster tout entier est considéré comme invalide (ne communique pas avec la BS).

Le protocole HEEP adopte le concept de la rotation aléatoire du rôle de CH proposé par LEACH, qui régule la dissipation de l'énergie permettant d'éviter que les nœuds choisis comme CHs meurent plus rapidement. Cependant, par opposition à LEACH, HEEP réutilise le concept de PEGASIS, il organise les nœuds du cluster sous forme de chaîne, ce qui a pour effet de prévenir que les nœuds les plus éloignés des CHs épuisent leurs réserves d'énergie. En ce qui concerne l'accès au medium (*Media access*), la même méthode proposée dans LEACH a été utilisée, où les CHs établissent un plan de transmission (*TDMA schedule*) qui attribue à chaque nœud le temps exact pendant lequel il doit transmettre ses données collectées [8].

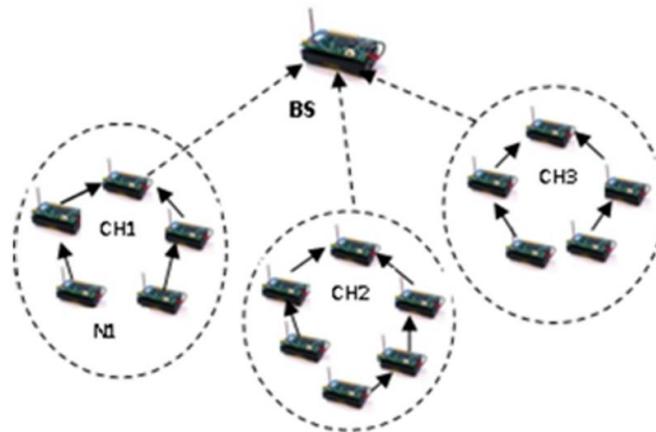


Figure 5.1 Organisation des nœuds dans le réseau.

5.2.1 Les grandes étapes du protocole HEEP

Le déroulement du protocole HEEP est divisé en plusieurs cycles d'exécution. Chaque cycle commence par une phase d'initialisation dans laquelle les clusters à chaînes sont formés et les CHs sont élus, suivie d'une phase de transmission où les données collectées sont transmises à travers les chaînes aux CHs, ces derniers les transmettent à leur tour à la station de base. Les nœuds doivent être synchronisés de façon à participer à la phase d'initialisation en même temps. La Figure 5.2. montre les étapes d'exécution du protocole HEEP. A chaque

phase de transmission, tous les nœuds appartenant au même cluster sont délégués pour la tâche de la collecte des données (*tâche à faible consommation énergétique*), tandis que la tâche la plus coûteuse en énergie (*la tâche de transmission des données vers la BS*) est assignée au nœud possédant la plus grande réserve d'énergie, ce dernier est le CH. Cela signifie que HEEP délègue la tâche la plus coûteuse en énergie à un seul nœud dans le cluster à chaque phase de transmission et assigne la tâche de collecte aux nœuds restants, même s'il y a plusieurs nœuds puissants dans le cluster. Afin de minimiser les problèmes d'interférence et d'overhead, la durée de la phase d'initialisation est fixée de façon à être beaucoup plus petite par rapport à la phase de transmission.



Figure 5.2 Les étapes d'exécution du protocole HEEP.

Le coût énergétique de la phase d'initialisation est très faible comparé à la phase de transmission, et dépend du nombre de nœuds dans le réseau et la distance de la BS par rapport au réseau, nous pouvons l'estimer par la règle suivante [8]:

$$\sum_{i=1}^{i=N} (q_i E_{elect} + q_i E_{fs} d_{toBS}^2) \quad (5.1)$$

Où :

q_i : est la taille d'un paquet de contrôle transmis par un nœud i ,

E_{elect} : est l'énergie consommée par les circuits électroniques (*énergie de calcul*),

E_{fs} : est l'énergie perdue dans l'espace de transmission,

d_{toBS} : est la distance géographique entre un nœud i et la station de base, et N est le nombre de nœuds vivants dans le réseau.

Le total d'énergie initiale dans le réseau est défini par l'équation suivante:

$$E_{total} = NE_0 \quad (5.2)$$

E_0 est l'énergie initiale de chaque nœud dans le réseau et N est le nombre de nœuds du réseau.

La durée de vie du réseau est divisée en plusieurs phases de communication (cycle). Nous estimons le nombre de ces dernières par l'équation suivante :

$$Nb_{round} = \frac{E_{total}}{E_{round}} \quad (5.3)$$

Où E_{round} est le total d'énergie consommée durant une phase de communication. Celle-ci est calculée suivant l'équation (5.4) :

$$E_{round} = q[2NE_{elect} + NE_{DA} + NE_{fs}d_{tonextnode}^2 + E_{mp}d_{CHtoBS}^4] \quad (5.4)$$

E_{DA} est l'énergie consommée durant l'agrégation des données, d_{CHtoBS} est la distance moyenne entre les CHs et la BS, $d_{tonextnode}$ est la distance moyenne entre les nœuds voisins dans la chaîne, q est la taille des paquets de données à transmettre, N est le nombre de CHs dans le réseau E_{fs} et E_{mp} représentent l'énergie perdue dans l'espace de transmission. Étant donné que les distances de transmission sont réduites, le nombre de phases de communication est impérativement optimisé. Le total des distances de transmission peut être calculé par la formule suivante :

$$d_{Total} = \iint \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} dx dy \quad (5.5)$$

Où X_j et Y_j sont les coordonnées du prochain nœud dans la chaîne de transmission.

5.3 Mécanisme de différenciation de service pour les RCSF

Dans un réseau de capteurs sans fil, un nœud peut avoir plusieurs types de données captées. Ces données peuvent avoir des différents niveaux d'importance. Quelques applications du RCSF nécessitent la transmission du trafic temps réel par les nœuds capteurs. Toutefois, ce trafic temps réel exige une petite latence et une grande fiabilité.

Pour cela, la différenciation de service est la technique principale utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil pour le support de la QoS. Cependant, utilisée seule, elle n'est pas suffisante pour obtenir des garanties déterministes. La QoS dans les réseaux de capteurs sans fil est donc largement best-effort [103]. Le premier volet dans la différenciation de service est la classification du trafic, i.e. la spécification de la priorité de chaque paquet circulant dans le réseau. Le choix peut être statique ou dynamique. Dans le premier cas, une priorité est attribuée au paquet dès sa création, elle ne change pas au cours de sa traversée du réseau [104]. L'attribution peut être en fonction du type de trafic de la donnée captée ou n'importe quel ordre spécifié par les concepteurs du réseau. Dans le deuxième cas, la priorité varie pendant la traversée du paquet. Elle dépend par exemple, du nombre de sauts traversés, du nombre de sauts restants, de l'énergie restante d'un nœud, de l'échéance du paquet et de la charge subie. Le deuxième volet concerne les mécanismes mis en œuvre pour la différenciation de service. Dans les réseaux de capteurs sans fil, elle se base essentiellement sur la variation des paramètres du protocole d'accès en fonction de la priorité du trafic [105].

La différenciation de service est l'un des mécanismes de base de la QoS. Elle prend tout son sens lorsque le réseau est amené à gérer plusieurs classes de trafic, qui ont chacune leurs exigences. Tel est le cas pour les réseaux de capteurs sans fil. En effet, les flux de données peuvent être plus ou moins urgents à transmettre. Il est clair qu'implémenter un mécanisme de différenciation de service est une nécessité afin de gérer ces différentes classes de flux.

Les classes définies par le modèle DiffServ sont les suivantes :

Expedited Forwarding (EF) : il s'agit d'une classe de trafic nécessitant une faible latence. L'accent est mis sur les délais de transmission. Les paquets de la classe EF sont envoyés prioritairement sur le lien par rapport aux paquets best effort.

Assured Forwarding (AF) : cette classe est destinée aux applications sensibles à la perte des paquets. Les paquets appartenant à cette classe doivent être éliminés le plus rarement possible en cas de congestion. Par contre, aucune garantie n'est fournie sur les délais.

L'architecture DiffServ autorise jusqu'à 64 classes de trafic. Les deux exemples ci-dessus ne sont pas les seules politiques applicables. On peut aisément imaginer d'implémenter des classes offrant des garanties sur la gigue (variation du délai) par exemple.

5.4 Protocole QoS-HEEP (Hybrid Energy Efficient Protocol with Quality of Service for WSN)

5.4.1 Mécanisme de rétrocontrôle « feedback control » pour l'agrégation de données

Pour améliorer les performances du réseau précisément dans l'agrégation de données, nous avons utilisé un mécanisme rétrocontrôle qui adapte dynamiquement le degré d'agrégation de données dans chaque nœud capteur en fonction de la charge du réseau ; un mécanisme de rétrocontrôle est requis pour contrôler le délai du réseau de telle sorte que les contraintes de temps soient respectées. Le mécanisme « feedback control » a été récemment introduit dans le RCSF, particulièrement dans le processus d'agrégation de données [106]. Ce mécanisme permet dynamiquement d'adapter le degré d'agrégation de données en fonction des conditions de la charge du réseau tout en respectant le temps d'application [107]. Une importante considération dans l'utilisation de cette approche d'agrégation pour les RCSF est de quantifier les contraintes fondamentales pour laquelle chaque capteur est conçu pour résoudre les problèmes d'optimisation des performances. Les contraintes de base sont l'énergie, le temps et le contenu de l'information. Le mécanisme de rétrocontrôle a prouvé son efficacité avec la possibilité de contrôler même si des erreurs avaient été commises pendant la phase de modélisation ou lorsque l'environnement change.

Le mécanisme feedback control pour lequel nous avons opté a été proposé par Tarek Abdelzaher et al. dans [106]; Il a pour but d'assurer une optimisation distribuée de la performance en maintenant un délai acceptable lors de la délivrance des données avec une consommation d'énergie réduite grâce à un degré d'adaptation d'agrégation de données qui peut éventuellement améliorer la durée de vie du réseau et montrer une performance fondamentale [108].

Ce mécanisme est basé sur deux types d'agrégation de données : l'agrégation avec perte et sans perte. En agrégation sans perte, les paquets de données sont concaténés en paquets plus grands sans perte de données. L'agrégation avec perte garantit la consommation d'énergie même si le réseau n'est pas très chargé. Le protocole proposé est conçu de telle sorte qu'il détermine de façon adaptative le type et la quantité d'agrégation de données requise afin de respecter les contraintes de délai de bout en bout. Tout d'abord, le système de contrôle décide du type d'agrégation en fonction de la charge du réseau. En effet, l'agrégation sans perte est effectuée tant que la charge de réseau est inférieure à la capacité du système. L'agrégation avec perte n'est invoquée que lorsque la capacité du système est dépassée.

Le système de contrôle repose essentiellement sur la quantification de la capacité du réseau qui consiste à quantifier la quantité d'informations pouvant être transmises par le réseau. Il est préférable d'utiliser une nouvelle notion de capacité qui est la capacité en temps réel notée CRT qui est pertinente pour les applications temps réel. Pour déterminer la quantité d'agrégation requise pour chaque type, deux boucles de rétroaction sont utilisées: boucle de

rétroaction (*feedback loop*) pour l'agrégation avec perte et boucle de rétroaction pour l'agrégation sans perte.

Boucle de rétroaction pour l'agrégation avec perte

La Boucle de rétroaction d'agrégation avec perte est activée lorsque la quantité de données générée par les capteurs du réseau dépasse la capacité du système. Le contrôleur de cette boucle essaie d'équilibrer entre le temps désiré et la quantité d'informations délivrées. Ainsi, la boucle avec perte doit contrôler le degré d'agrégation de sorte que le débit est maximisé [106].

La somme des utilisations synthétiques de toutes les sources de données peut être supérieure à celle du nœud Sink lorsqu'on utilise la boucle d'agrégation avec perte, car la quantité des données générées dans le réseau est supérieure à celles délivrées au nœud Sink. Il est souhaitable de concevoir un schéma d'agrégation qui maximise la capacité totale en temps réel; La solution qui maximise la capacité doit être symétrique par rapport à l'utilisation synthétique. L'utilisation synthétique U de chaque nœud dans un chemin de communication de longueur N doit satisfaire l'équation suivante [108]:

$$\frac{U(1-U/2)}{1-U} < \frac{\alpha}{N} \quad (5.6)$$

Le paramètre α dépend de la politique d'ordonnancement utilisée pour ordonner les paquets de données sortants du lien.

On obtient:

$$U < 1 + \frac{\alpha}{N} - \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{N}\right)^2} \quad (5.7)$$

Pour maximiser le débit des informations temps réel, le contrôleur local au niveau de chaque nœud tente à conserver son utilisation synthétique identique à la valeur indiquée dans le côté droit de l'inégalité (5.7). Par conséquent, l'utilisation synthétique désirée U_{desired} est donnée par l'équation suivante :

$$U_{desired} = 1 + \frac{\alpha}{N} - \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{N}\right)^2} \quad (5.8)$$

Boucle de rétroaction pour l'agrégation sans perte

La boucle d'agrégation sans perte est utilisée pour optimiser la consommation d'énergie et réduire les délais seulement lorsque le système n'est pas surchargé. Pour adapter le degré d'agrégation de données sans perte, cette boucle mesure le délai moyen de transmission d'un paquet, appelé N_{aggr} . Le degré d'agrégation par défaut N_{aggr} est égal à 1, qui se produit lorsque la charge du réseau est faible. La Boucle de contrôle d'agrégation sans perte est générée périodiquement dans un intervalle choisi de manière aléatoire T , pour mesurer le délai de la couche MAC $D(k)$ et ajuster le degré d'agrégation, $N_{aggr}(k)$. Cette valeur représente le délai moyen de la couche MAC de tous les paquets transmis dans ce dernier intervalle. Le système ensuite utilise un contrôleur pour éliminer les erreurs. Il est donné par:

$$\delta N_{aggr}(k) = P N_{aggr}(k-1)^2 e(k) \quad (5.9)$$

Avec:

P : le gain du contrôleur.

$$e(k) = D(k) - D_{desired} \quad (5.10)$$

5.4.2 Modèle de différenciation de service

Le modèle que nous adoptons pour supporter la QoS dans le réseau de capteurs sans fil est celui présenté par M. Yaghmaee et D. Adjeroh dans [105]. Ce modèle a été implémenté sur le protocole HEEP pour garantir la QoS dans le réseau. Ce modèle peut supporter deux types différents de classes de trafic qui sont:

Expedited Forwarding (EF): classe associée aux trafics temps réel.

Assured Forwarding (AF): classe associée aux trafics non temps réel.

Le trafic non-temps réel (AF) peut être divisé en trois niveaux d'importance en fonction de leurs exigences en ressources du réseau. Nous considérons quatre types de classes de trafic: le trafic temps réel (la classe EF), le trafic non temps réel avec une haute priorité (classe AF1), le trafic non temps réel avec une priorité moyenne (classe AF2) et le trafic non temps réel à faible priorité (classe AF3). Ainsi, une priorité différente est attribuée à chaque classe de trafic.

La garantie d'un délai réduit est un défi majeur pour le trafic temps réel, toutefois, le modèle que nous avons utilisé garantit un délai faible pour ce type de trafic. La figure 5.3 présente un réseau de capteurs avec des nœuds possédant différentes classes de trafics. Afin de pouvoir classifier le trafic entrant nous avons utilisé des files d'attentes séparées pour chaque type de classe de trafic.

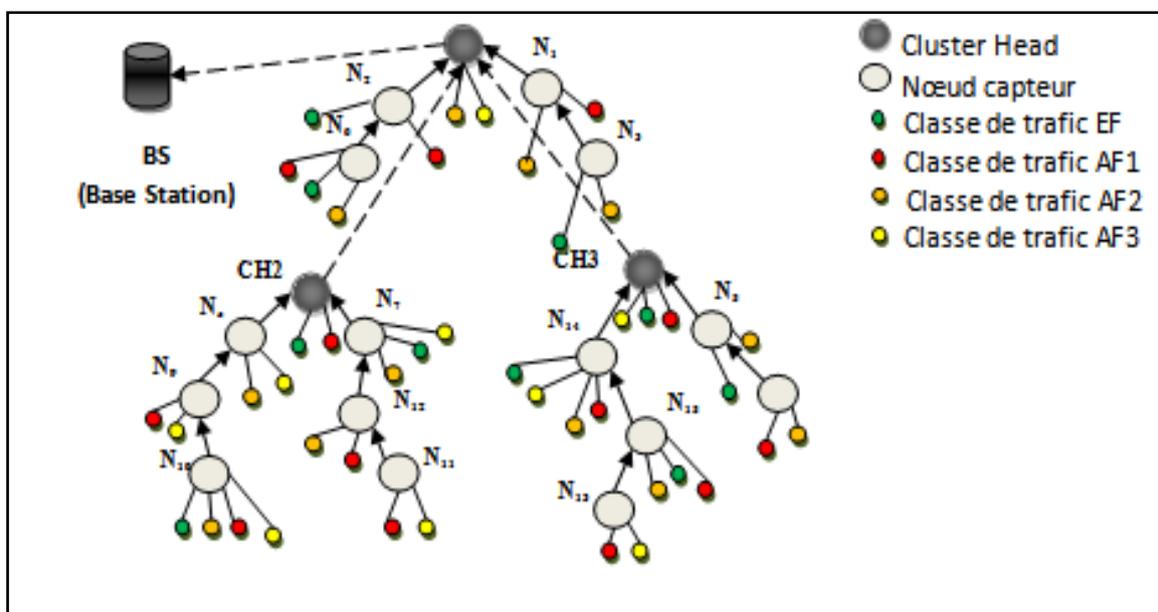


Figure 5.3 Un réseau de capteurs sans fil avec différentes classes du trafic.

Le modèle de file d'attente de chaque nœud est représenté dans la figure 5.4. Pour distinguer entre les classes de trafic, le nœud sans fil ajoute un identificateur de classe de trafic à chaque paquet et le met dans la file d'attente appropriée. Cet identificateur représente la classe de trafic de chaque paquet. En effet, pour chaque nœud intermédiaire, les paquets arrivés sont envoyés aux différentes files d'attente en fonction de leur classe de trafic. Pour les classes AF le mécanisme RED est utilisé pour garantir la différenciation de service au sein des nœuds capteurs.

Pour fournir la qualité de service à la classe de haute priorité EF dans le réseau de capteur sans fil, on utilise le mécanisme de priorité « Priority Queuing (PQ) » qui favorise le processus de transmission de paquet à chaque nœud.

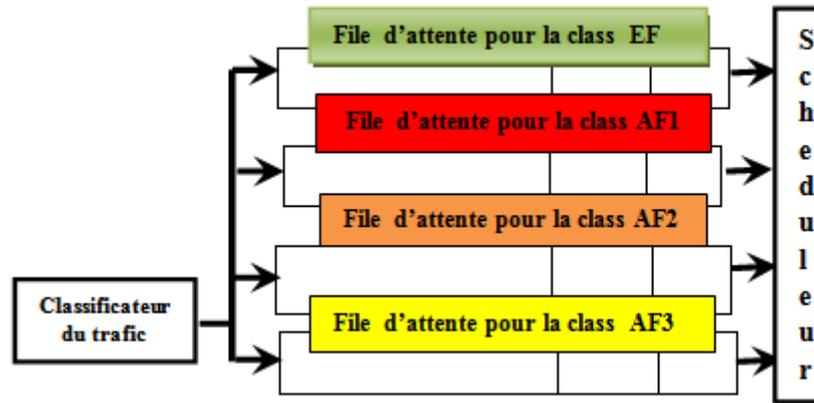


Figure 5.4 Classification du trafic et modèle de file d'attente.

Supposons que chaque nœud i possède différentes sources de trafic.

Soit $SP_{j,i}$ la priorité de la source du trafic j dans le nœud capteur i . La valeur de $SP_{j,i}$ pourrait être réglée manuellement pour obtenir la différenciation de services. Il est clair que pour un trafic de haute priorité, la valeur de $SP_{j,i}$ est suffisamment élevée pour que nous puissions la distinguer des autres trafics à faible priorité [109].

Nous définissons la priorité du nœud NP_i comme la somme de la priorité de la source $SP_{j,i}$ comme suit:

$$NP_i = \sum_j SP_{j,i} \quad (5.11)$$

Avec :

j : représente la classe du trafic (une des classes de trafics existantes EF, AF1, AF2, AF3).

La priorité globale GP_i peut être définie comme la somme des priorités de tous les nœuds fils du nœud i .

$$GP_i = \sum_{k \in c_i} GP_k + NP_i \quad (5.12)$$

C_i : L'ensemble de nœuds voisins du nœud i .

Comme chaque nœud capteur peut avoir des classes de trafics différentes, la priorité globale pour chaque classe de trafic peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned}
 GP_{EF,i} &= \sum_{k \in c_i} GP_{EF,k} + SP_{EF,i} \\
 GP_{AF1,i} &= \sum_{k \in c_i} GP_{AF1,k} + SP_{AF1,i} \\
 GP_{AF2,i} &= \sum_{k \in c_i} GP_{AF2,k} + SP_{AF2,i} \\
 GP_{AF3,i} &= \sum_{k \in c_i} GP_{AF3,k} + SP_{AF3,i}
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Soit T_i le temps de service du paquet courant dans le nœud i .

Le temps de service moyen est :

$$T_{trans} = (1-\alpha)T_{trans} + \alpha T_i \tag{5.14}$$

α : c'est une constante.

A noter que le temps de service moyen T_{trans} est le temps nécessaire pour transmettre avec succès un paquet de données au-dessus de la couche MAC.

Étant donné que T_{av_i} est le temps d'arrivée de chaque paquet vers le nœud i . Cette valeur est mise à jour périodiquement à chaque fois qu'il y a M nouveaux paquets comme suit :

$$T_{av_i} = (1-\beta)T_{av_i} + \beta \cdot \frac{T_M}{M} \tag{5.15}$$

β : c'est une autre constante.

T_m : c'est l'intervalle de temps dans lequel les mesures sont effectuées, et dans lequel les m nouveaux paquets arrivent.

Le temps de service des paquets est exprimé comme suit:

$$T_{PST} = T_{Net} + T_{Queue} + T_{MAC} + T_{Transmit} \tag{5.16}$$

T_{NET} : Est le délai de traitement du réseau; Cela inclut tout le temps nécessaire pour la détermination du chemin et l'envoi du paquet vers la couche inférieure.

T_{Queue} : Est le temps d'attente au niveau des files d'attente.

T_{MAC} : Est le délai de la couche MAC, ici le délai engendré par la contention est pris en compte, tels que la détection de canal ou la réservation du canal.

$T_{Transmit}$: Est le délai de transmission, ce délai dépend de la taille du paquet et de la bande passante disponible.

Le temps moyen de service de paquets PST_{avg} [108] peut être estimé comme indiqué dans l'Algorithme 1.

```

=====
                        Algorithme 1: Le temps de service du paquet.
=====
Initialisation
1.  $T_{PST} = 0$  ,  $i = 0$ 
2. Pour chaque paquet reçu dans un intervalle de temps  $t$ 
   faire
3.  $T_r$  = le temps d'arrivé du paquet à la couche MAC,
4.  $T_i$  = le temps de transmission du dernier bit du paquet
5.  $T_{PST} = T_i - T_r$ 
6.  $PST_{Total} = PST_{Total} + T_{PST}$ 
7.  $i ++$ 
8. Fin
9. La fin de l'intervalle de temps  $t$ 
10.  $PST_{avg} = PST_{Total} / i$ 
   Fin.
=====

```

Le coût énergétique de la phase d'initialisation est le même que celui du protocole HEEP et il est très faible (voir Equation 1) par rapport à la phase de transmission. Le total d'énergie initiale dans le réseau est défini par l'équation donnée:

$$E_{total} = NE_0 \quad (5.17)$$

Où :

E_0 : Est l'énergie initiale de chaque nœud dans le réseau et N est le nombre de nœuds du réseau.

E_{round} : est le total d'énergie consommée durant une phase de communication. Celle-ci est calculée par l'équation suivante:

$$E_{round} = q[2NE_{elect} + NE_{DA} + NE_{tclass} + NE_{fs}d^2_{tonextnode} + E_{mp}d^4_{CHtoBS}] \quad (5.18)$$

E_{tclass} : Est le coût énergétique de la classification du trafic au niveau de chaque nœud.

L'énergie consommée dans chaque étape est résumée dans le tableau ci-dessous:

Étape	Energie Consommée (mW)
Transmission (T_x)	14.88
Réception	12.50
Mise en veille	0.016
Classification de trafic	0.62

Tableau 5.1 L'Énergie consommée dans chaque étape.

L'énergie consommée par le protocole QoS-HEEP et le nombre de nœuds vivants sont donnés dans le tableau 5.2. Le temps de simulation est fixé à 2000 secondes et arrêté si tous les nœuds du réseau épuisent leurs réserves d'énergie.

QoS-HEEP/ temps (s)	Energie consommée (J)	Nombre de nœuds vivants
10	0,125	100
100	0,156	72
200	0,172	56
300	0,185	52
400	0,201	34
460	0,312	32
510	0,487	25
560	0,502	21
610	0,513	18
620	0,551	16
630	0,566	14
830	0,654	7
870	1,227	5
930	1.456	3
1340	2	0

Tableau 5.2 L'énergie consommée par le protocole QoS-HEEP /nombre de nœuds vivants.

5.5 Evaluation des performances du protocole QoS-HEEP

5.5.1 Présentation du simulateur NS-2

NS-2 [110], [111] « Network Simulator version 2 » est un outil de simulation « Open Source » qui appartient à la famille des simulateurs événementiel « Event-Driven » [53]. Ce simulateur a été conçu pour la recherche spécialisée dans le domaine des réseaux informatiques, plus particulièrement, les protocoles de communication filaire et sans-fil. NS-2 est l'un des simulateurs les plus utilisés dans ce domaine de recherche. Il dispose d'un nombre important de modèles de protocoles de toutes les couches du modèle OSI « Open System Interconnexion » allant de la couche physique à la couche Application. Comme les autres simulateurs de réseaux, NS-2 a été développé en utilisant deux langages de programmation : le langage C++, qui définit les mécanismes internes des objets de simulation (le noyau du simulateur) et le langage Otcl « Object-oriented Tool Command Language » qui est responsable de la configuration et la liaison de ces objets ainsi que l'ordonnancement des événements « Events Scheduling ». Il joue le rôle d'une interface entre l'utilisateur et le noyau du simulateur à travers le script TCL « Tool Command Language ». Cette architecture est introduite afin de permettre une exécution rapide grâce au langage C++ pour le détail d'implémentation des protocoles, en plus de la possibilité de modifier la configuration de manière rapide et interactive à travers le langage OTCL.

5.5.2 Avantages et limites de la simulation

L'utilisation de la simulation présente plusieurs avantages. D'une part, la simulation est peu coûteuse, car les simulateurs existants sont majoritairement gratuits et Open Source. D'autre part, le temps de développement et de simulation est très inférieur comparé aux implémentations réelles. En outre, le simulateur permet d'accélérer le temps et de prédire le comportement du système étudié. À titre d'exemple, on peut simuler la durée de vie des capteurs en un temps très court, vu que le temps lui-même est virtuel. Aussi, le simulateur peut être un outil d'évaluation complémentaire aux expérimentations réelles, car dans certains cas de figure, il est difficile d'avoir un grand nombre de nœuds réels, d'où l'intérêt de la simulation qui permet de faire le passage à l'échelle par une simple modification du script de simulation.

On parle dernièrement d'un nouveau paradigme dans lequel le simulateur ne joue pas seulement le rôle d'un outil d'évaluation, mais aussi sera une composante qui participe de manière active à la réalisation de quelques tâches dans le système réel [53]. Par exemple, en se basant sur les résultats obtenus du réseau réel, le simulateur peut créer les tables de routage et distribuer les changements aux nœuds de ce réseau.

Malgré tous ces avantages, les outils de simulation présentent quelques limites. Le plus grand inconvénient étant lié aux modèles des protocoles et leurs degrés de correspondance à la réalité (p. ex. propagation des ondes radio). En effet, le modèle utilisé pour simuler un protocole est un modèle théorique qui a recours à plusieurs simplifications.

Une étude a été menée dans [112] dans l'optique de voir la pertinence des résultats de simulation comparés aux implémentations réelles dans les réseaux sans fil. Cette étude montre que les résultats de simulation peuvent être proches des résultats réels dans certaines conditions, surtout si le choix du modèle de la couche physique et de ses paramètres (plus particulièrement, le modèle de propagation) est correct. Mais, le simulateur peut ne pas être adapté dans d'autres contextes. Ainsi, les résultats obtenus par simulation peuvent donner une estimation des performances, mais chaque protocole doit être validé sur des équipements réels afin d'obtenir des résultats plus précis et plus réalistes.

5.5.3 Environnement de simulation

Les performances de notre protocole ont été évaluées à travers le simulateur réseau NS-2.34 son caractère open source nous a permis de définir notre propre protocole et d'apporter toutes les modifications nécessaires. Dans cette section nous allons exposer l'ensemble d'expérimentations et des simulations (réalisées avec le logiciel de simulation de réseaux NS-2) que nous avons réalisées, dans le but de valider la solution proposée. Pour bien illustrer les performances de notre protocole les résultats obtenus après de nombreuses simulations pour chaque scénario ont été comparés à ceux donnés par le protocole HEEP et d'autres protocoles avec Qualité de service pour les RCSF. Notre modèle d'expérimentation a été établi sur 100 nœuds répartis aléatoirement sur une surface carrée de 100 m \times 100 m, nous supposons que tous les nœuds ont une position fixe pendant toute la période de simulation. Notre modèle d'expérimentation est présenté dans la Figure 5.5.

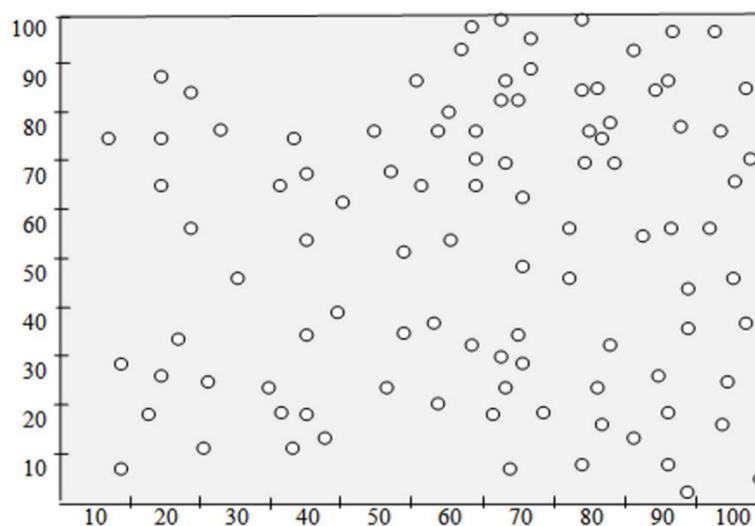


Figure 5.5 Modèle d'expérimentation.

Nous supposons un modèle simple de dissipation d'énergie radio en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Où l'émetteur dissipe de l'énergie durant l'utilisation de son antenne radio pour la transmission des données, et le récepteur consomme également de l'énergie pour recevoir les données via son antenne.

Tous les paramètres de notre simulation sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Valeur
La surface du réseau	100 × 100 m ²
La localisation de la BS	(20, 175)
Le nombre de nœuds	100
Le nombre de clusters	5
L'énergie initiale des nœuds	2 J
Taille du paquet de données	512 Bytes
Modèle de trafic	CBR
Model de propagation Radio	Free space

Tableau 5.3 Paramètres de simulation.

La station de base est positionnée à 75 mètres par rapport au nœud le plus proche ($X=20$, $Y=175$). La largeur de bande de transmission est initialisée à 1Mbps.

Tous les nœuds du réseau commencent la simulation avec une énergie initiale de 2 J et une quantité de données illimitées à transmettre à la station de base. De plus, l'énergie de la station de base est considérée comme illimitée.

Le trafic est généré à l'aide du protocole UDP (User Datagram Protocol) et Constant Bit Rate (CBR). Chaque nœud capteur utilise la politique de gestion de file d'attente Priority Queuing (PQ) qui régit la façon dont les paquets sont mis en file d'attente avant d'être transmis. Dans cette politique, les paquets prioritaires (de la classe EF) sont envoyés en premiers avant les paquets à faible priorité. Lorsqu'un nouveau paquet temps réel arrive la transmission des paquets non temps réel est interrompue. Néanmoins si d'autres paquets de haute priorité arrivent alors que les files d'attente inférieures (AF1 ou AF2 ou AF3) sont en train d'être servi, le service est immédiatement commuté pour la file d'attente de priorité élevée. Le mécanisme PQ offre un faible délai pour le trafic temps réel. Pour les classes AF, nous avons utilisé le mécanisme RED (Random Early Detection) qui nous permet d'obtenir une différenciation de services au niveau des nœuds capteurs.

5.5.2 Résultats de la simulation

Plusieurs scénarios ont été étudiés durant la simulation afin d'évaluer les performances de notre protocole. Nous considérons un réseau de capteurs sans fil où les nœuds peuvent avoir différents types de trafic: EF, AF1, AF2 et AF3. Les résultats obtenus prouvent l'intérêt de la différenciation de service en observant la capacité du réseau à répondre aux exigences de QoS.

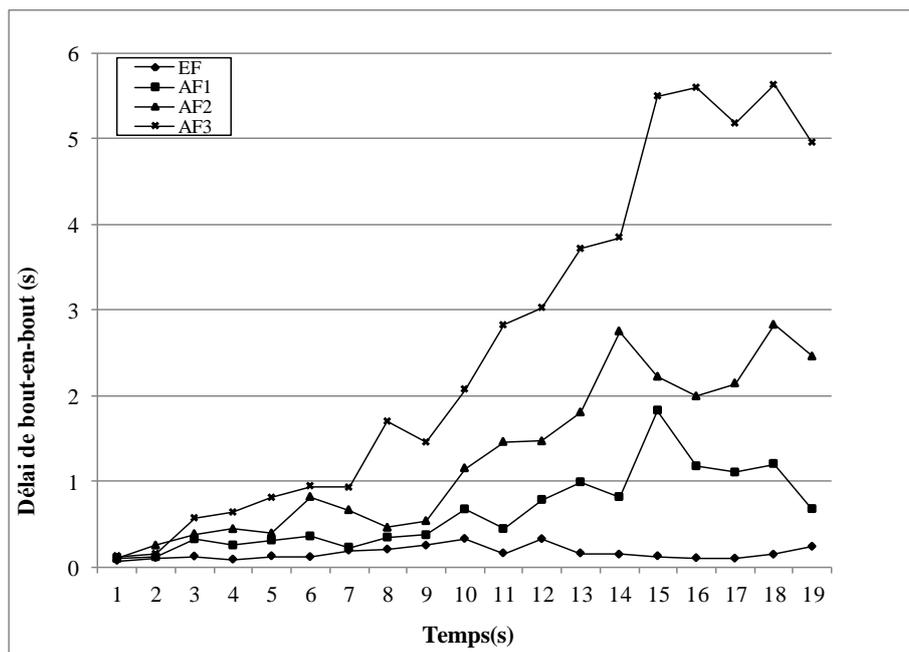


Figure 5.6 Le délai de bout en bout de chaque classe de trafic.

En se basant sur les résultats de la simulation, nous pouvons observer dans la figure 5.6 la différence de délais entre les différentes classes de trafic. La classe de trafic EF a le plus faible délai de bout-en-bout comparé aux autres classes de trafic. En effet, le délai d'attente des paquets temps réel dans la file est toujours zéro, tandis que la classe AF3 a le plus grand délai de bout-en-bout en le comparant avec les autres types de trafic.

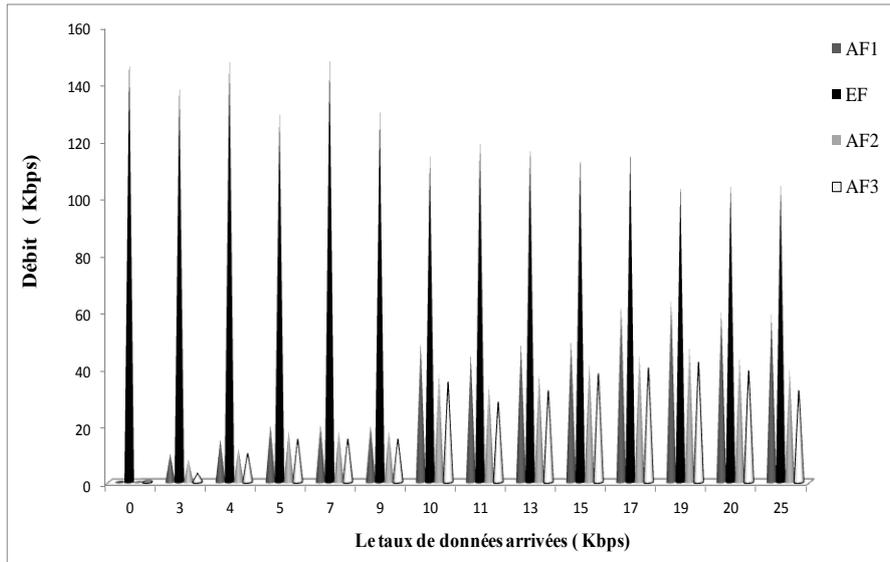


Figure 5.7 Le débit de chaque classe de trafic.

La figure 5.7 expose le débit sur les paquets des quatre classes EF, AF1, AF2 et AF3. On peut clairement observer que les mesures de débit pour la première classe restent toujours supérieures à celles des autres classes. En résumé, le protocole QoS-HEEP offre de meilleures performances en termes de QoS pour le trafic temps réel.

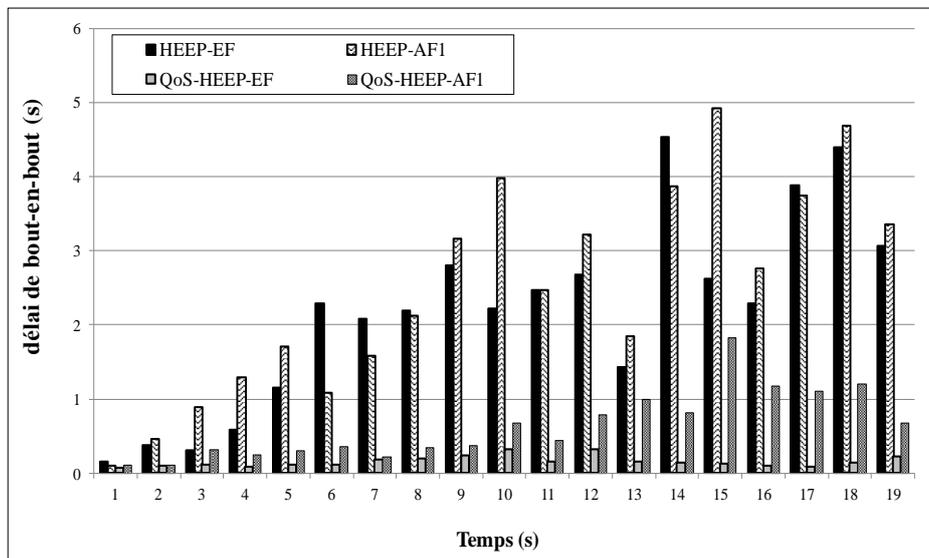


Figure 5.8 Comparaison du délai de bout-en-bout.

Pour comparer le délai de bout-en-bout des deux protocoles, HEEP et QoS-HEEP, nous avons mené de nombreuses simulations tout en augmentant à chaque fois le temps de simulation; Les résultats obtenus sont représentés par la figure 5.8. Les résultats montrent que le protocole QoS-HEEP basé sur la classification de trafic offre des meilleures performances en termes de latence de délivrance. Car le fait de donner la priorité locale aux paquets temps réel, au niveau des files d'attente au niveau MAC, cela donnera une plus grande probabilité d'accès au canal

sans fil et un meilleur délai de transmission. En revanche, le délai introduit par le protocole HEEP pour les classes de trafic EF et AF1 est toujours supérieur à celui introduit par le protocole QoS-HEEP.

La figure 5.9 montre l'efficacité du protocole QoS-HEEP en termes de taux de réception de messages de données prioritaires par la Station de Base. Les résultats illustrent clairement que le nombre de messages de la classe de trafic EF est très élevé par rapport à celui des autres classes de trafic (AF1, AF2 et AF3). D'un autre côté le nombre de messages reçu pour de la classe de trafic AF3 est le plus réduit.

Ensuite, nous comparons le nombre de messages de données (classe du trafic EF) reçus par la station de base des deux protocoles de routage HEEP et QoS-HEEP. La figure 5.10 montre que le nombre de paquets temps réel reçus par la station de base durant toute la période de simulation dans le cas du protocole QoS-HEEP est très élevé contrairement au protocole HEEP qui ne peut pas discriminer entre les différentes classes de trafic, le nombre de paquets temps réel reçus par la BS est dans ce cas très réduit.

Une autre métrique importante dans l'évaluation des performances des protocoles de communication avec QoS dédiés aux RCSF est le taux de perte de paquets. Dans notre simulation, nous avons mesuré le taux de perte des paquets pour chaque classe de trafic tout au long de la période de simulation. La figure 5.11, illustre les résultats que nous avons obtenus.

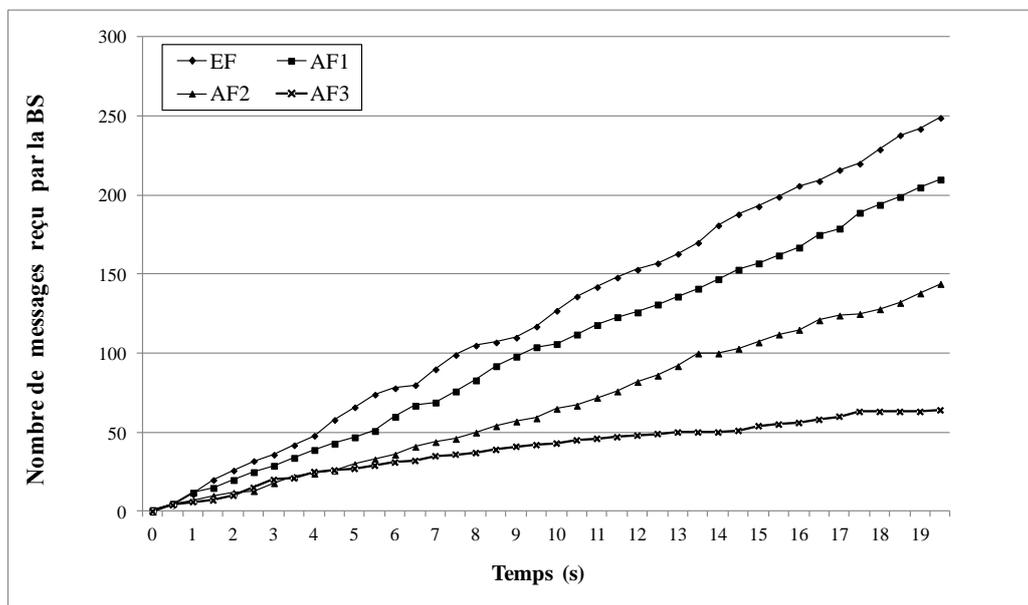


Figure 5.9 Nombre de messages reçus par la station de base.

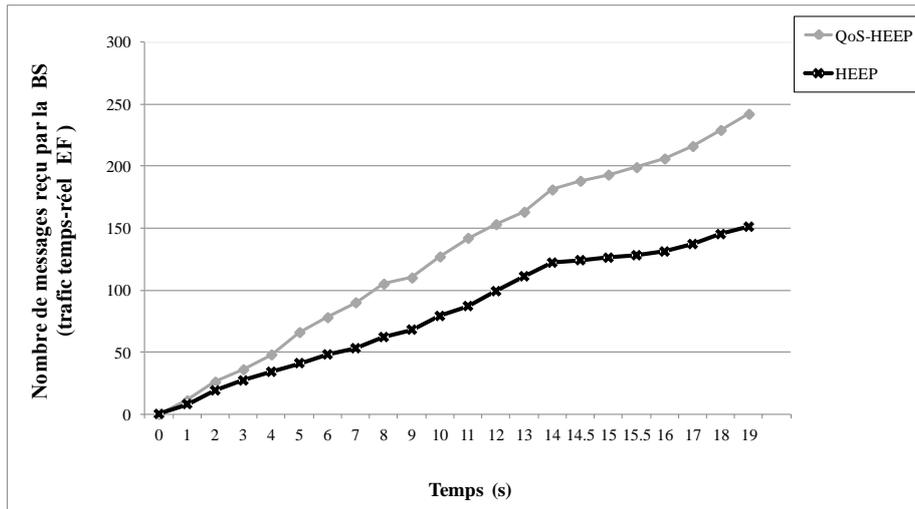


Figure 5.10 Nombre de messages (temps réel) reçus par la station de base. Comparaison entre HEEP et QoS-HEEP.

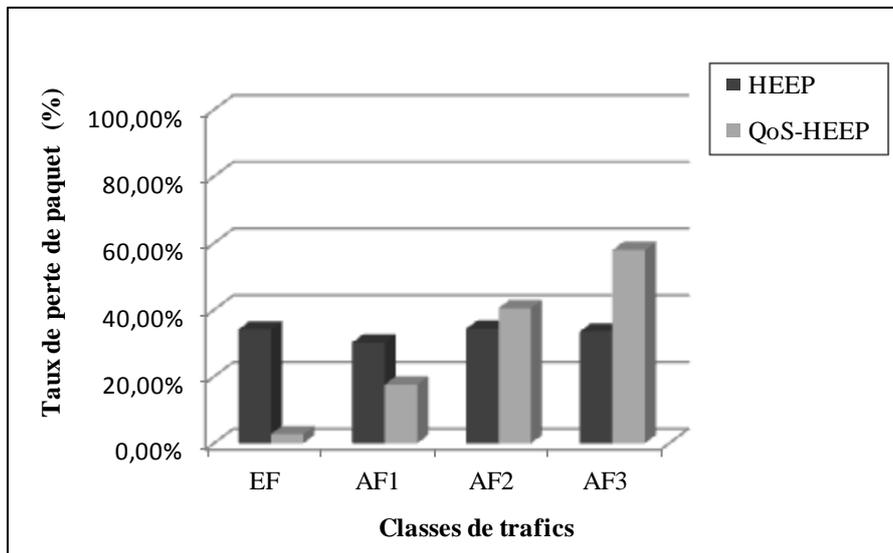


Figure 5.11 Taux de perte de paquets.

Afin de montrer l'efficacité du protocole QoS-HEEP nous avons comparé les résultats obtenus avec celles des autres célèbres protocoles basés sur la QoS : SPEED, MMSPEED et DARA. Le délai de bout-en-bout pour les protocoles: DARA, SPEED, MMSPEED, QoS-HEEP est présenté dans la figure 5.12. DARA et SPEED considèrent un délai de transmission à un seul chemin, tandis que QoS-HEEP considère le délai de transmission multi-chemins. Cependant, le chemin sélectionné entre la source et le nœud Sink peut être le plus court ce qui aidera à réduire le délai de bout-en-bout, de plus, le délai d'attente au niveau des files pour les paquets temps réel est toujours égale à zéro, ce qui peut diminuer le délai de cette classe de trafic. Le protocole MMSPEED prend en considération le délai de transmission et de file d'attente, mais l'utilisation des transmissions multi-chemin, un Seul-Sink peut causer de la congestion et produire plusieurs retransmissions inutiles des paquets, ce qui explique le délai relativement plus élevé. En revanche le protocole HEEP ne considère

aucune priorité et traite tous les paquets de la même façon, ce qui explique le grand délai engendré par ce protocole.

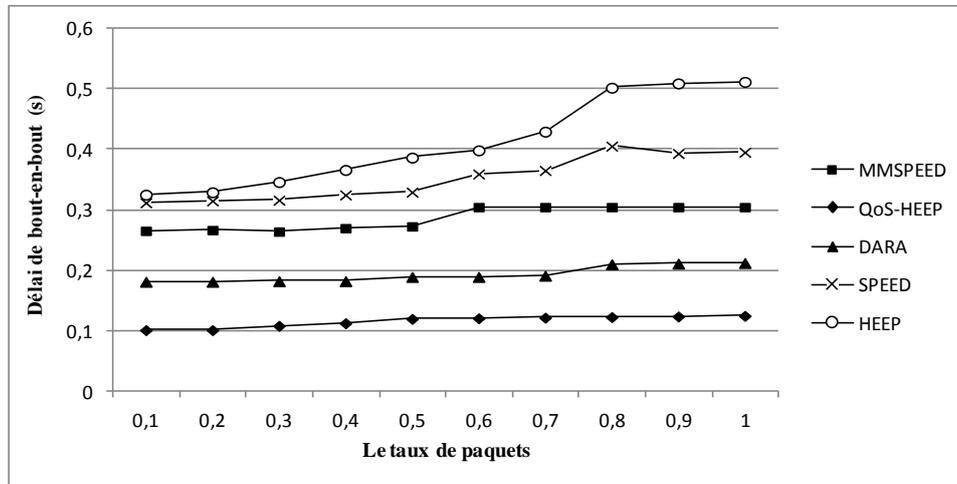


Figure 5.12 Délai de bout-en-bout versus le taux de paquets réel (Comparaison avec SPEED, DARA MMSPEED, HEEP).

L'étape suivante, consiste à mesurer la dissipation énergétique de notre protocole tout au long de la période de simulation. La figure 5.13 résume les résultats obtenus. De toute évidence, notre protocole offre de meilleures performances par rapport aux protocoles SPEED, DARA et MMSPEED en termes de gestion d'énergie et augmentation de la durée de vie du réseau. QoS-HEEP atténue la moyenne de dissipation d'énergie en réduisant la distance entre les nœuds et leurs CHs. Un autre facteur qui aide QoS-HEEP à obtenir de meilleurs résultats est l'utilisation de l'agrégation de données au niveau des chaînes, ce qui réduit le nombre de données transmises vers le CH et distribue la charge régulièrement entre les nœuds du même cluster. L'utilisation du mécanisme de rétroaction (feedback control mechanism) pour ajuster le degré d'agrégation des données par chaque nœud capteur peut améliorer la durée de vie du réseau et fournir des meilleures optimisations.

La dernière étape dans l'évaluation des performances du protocole QoS-HEEP consiste à analyser la latence en fonction du nombre de nœuds capteurs et de la comparer avec celle produite par les protocoles SPEED, DARA et MMSEED. La figure 5.14, démontre les performances de notre protocole en termes de latence.

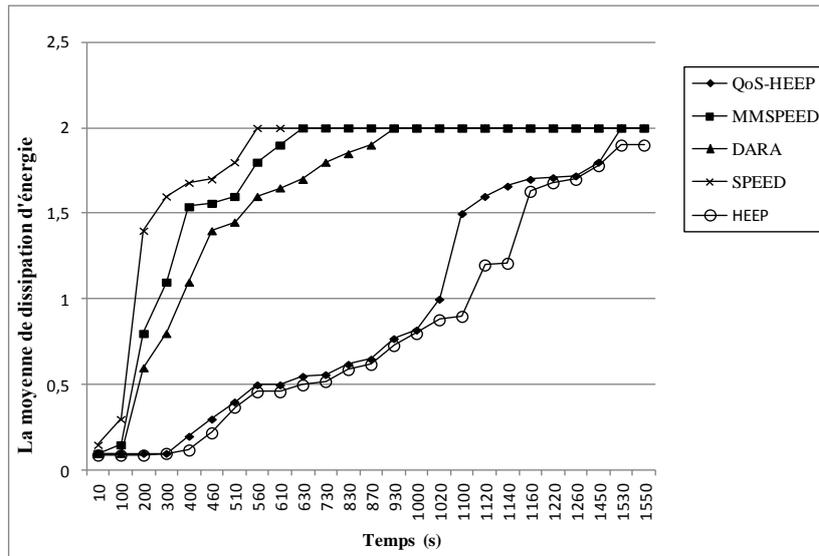


Figure 5.13 Dissipation d'énergie par rapport à la durée de vie du réseau.

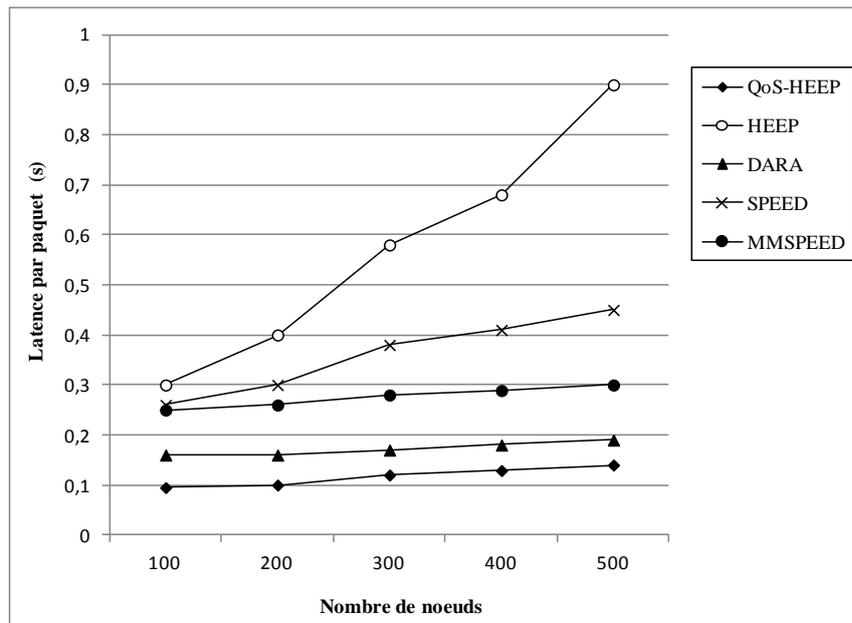


Figure 5.14 Latence versus nombre de nœuds capteurs.

5.6 Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur la proposition d'un nouveau protocole de communication pour les RCSF qui se doit d'être performant du point de vue qualité de service, ainsi que du point de vue énergétique. Le protocole proposé repose sur deux mécanismes différents (agrégation des données sans perte et agrégation avec perte) dans le but d'adapter dynamiquement le degré d'agrégation des données et maximiser le débit des données.

Pour obtenir une différenciation de service dans un RCSF, il est nécessaire d'envisager différentes priorités pour chaque source de trafic. Pour cela quatre classes de trafic différentes ont été proposées: classe de trafic temps réel (classe EF) de haute priorité, classe de trafic non temps réel (classe AF1) d'une haute priorité, classe de trafic non temps réel (classe AF2) d'une priorité moyenne, et classe de trafic de priorité faible (Classe AF3).

Nous avons présenté à travers ce chapitre les résultats d'évaluation de performances de la solution proposée. Les résultats obtenus confirment que le protocole QoS-HEEP présente des meilleures performances par rapport aux autres protocoles. Dans le chapitre qui suit, nous allons introduire notre deuxième contribution, qui consiste en un protocole avec gestion de QoS, basé sur une architecture d'interaction cross-layer.

Chapitre 6
Le protocole de communication
Cross-layer proposé

6.1 Introduction

Alors qu'une architecture en couches est simple et constitue donc un bon candidat pour une conception de base, il y a toujours le besoin d'optimiser. En effet, plusieurs occasions d'optimisation se présentent par l'interaction à travers les couches. Le passé récent a ainsi vu un engouement de propositions cross-layer qui explorent une interaction beaucoup plus riche entre les paramètres à travers les couches. En évaluant ces propositions, la différence entre la performance et l'architecture doit être fondamentalement considérée. Ainsi une suggestion cross-layer particulière peut rapporter une amélioration en termes de performances de débit et de délai.

Dans le présent chapitre, nous proposons une nouvelle solution inter-couche efficace en énergie afin de supporter la QoS dans les RCSF. Le protocole proposé repose sur la coopération entre les trois couches adjacentes du modèle OSI: physique, MAC et Réseaux. Pour une meilleure compréhension de la solution proposée, nous débutons ce chapitre par une introduction du protocole de routage proposé CLEEP-QoS. Ensuite, nous présentons l'interaction entre les différentes couches constituant notre solution dans la section suivante. Enfin, nous donnons les résultats de l'étude expérimentale portant sur les performances de l'approche inter-couches proposée.

6.2 Le protocole CLEEP-QoS: Cross-Layer Energy Efficient Protocol for QoS Provisioning in Wireless Sensor Network

6.2.1 Architecture Cross-layer

Nous proposons dans ce chapitre un nouveau protocole cross-layer avec Qualité de Service et une efficacité énergétique pour les RCSF [113]. Ce protocole présente une extension du protocole HEEP appelé CLEEP-QoS (Cross Layer Energy Efficient Protocol with QoS). Contrairement au protocole HEEP qui est conçu uniquement pour la couche réseau, nous introduisons ici une architecture inter-couche pour fournir une QoS tout en minimisant le délai de bout-en-bout des transmissions et en réduisant la consommation énergétique dans le réseau sans fil.

L'architecture cross-layer proposée conserve la structure en couches traditionnelle et considère l'interaction entre les trois couches adjacentes (voir la figure 6.1): couche physique, MAC et réseau.

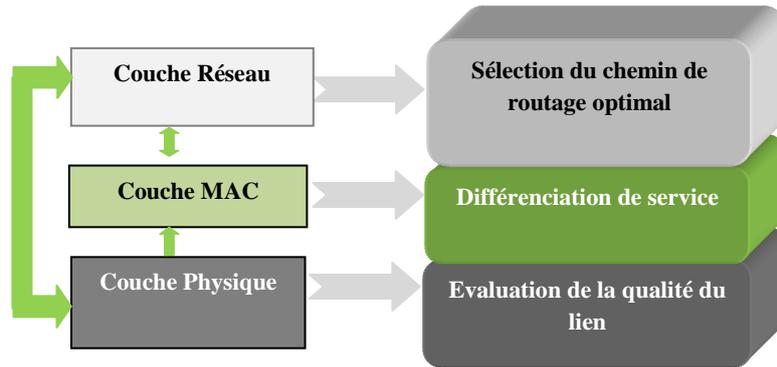


Figure 6.1 architecture Cross-layer.

Au niveau de la couche physique, une évaluation de la qualité du lien est effectuée, cette information est utilisée par la couche réseau pour sélectionner le prochain nœud qui permet d'optimiser les performances de QoS, tandis que les mécanismes de chaque couche restent intacts. Par ailleurs, ce protocole repose sur la coopération de la couche MAC afin de garantir la différenciation de service, en donnant aux paquets de haute priorité de plus grandes chances d'accéder au canal radio. La différenciation de services améliore la QoS du réseau en diminuant le délai de bout en bout. Par ailleurs, l'approche inter-couches avec différenciation de service permet d'atteindre une fiabilité et une qualité d'expérience plus importante, avec une complexité réduite.

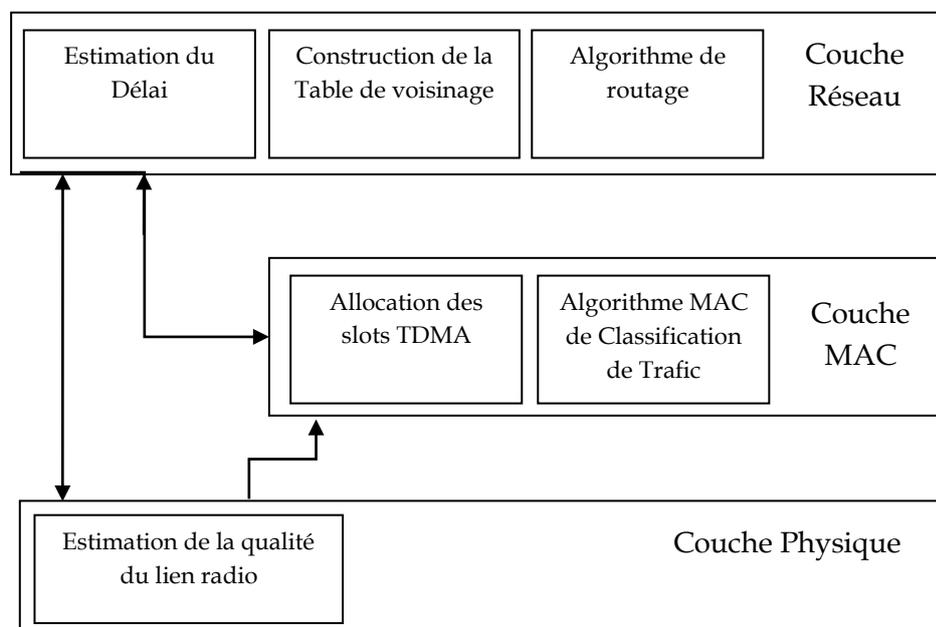


Figure 6.2 L'interaction entre les trois couches.

6.2.2 La couche physique : Evaluation de la qualité du lien radio

L'estimation de qualité du lien (LQE)

La couche physique assure l'activation et la désactivation du medium radio, la sélection du canal de communication, le test de l'occupation du canal noté CCA (pour Clear Channel Assessment), la détection d'énergie notée ED (pour Energy Detection) sur un canal, l'indication de la qualité d'un lien noté LQI (pour Link Quality Indicator), ainsi que la transmission et la réception des bits à travers le canal.

L'estimation de qualité du lien (LQE) [109] est un outil fondamental dans les communications sans fil pour augmenter la fiabilité des liens. Dans ce travail, nous avons sélectionné le taux de réception de paquets (PRR) [114] comme métrique d'estimation de la qualité de lien (LQE) [116]. Le paramètre Prr est défini comme le rapport du nombre de paquets reçus avec succès sur le nombre total de paquets envoyés.

Cette métrique est calculée au niveau du récepteur comme suit:

$$Prr = \frac{\text{Nombre de paquets reçu}}{\text{Nombre de paquets envoyés}} \quad (6.1)$$

L'estimation de la qualité de lien Prr_{N_i, N_j} calculée par le nœud N_i entre N_i et son voisin N_j dans la fenêtre w_p , est donnée par:

$$Prr_{N_i, N_j} = \frac{h}{w_p} \quad (6.2)$$

Avec:

h : le nombre de messages Hello reçus par N_i de son nœud voisin N_j après la transmission de w_p paquets à N_j .

Prr_{N_i, N_j} Dépend de la valeur sélectionnée de w_p si elle est trop grande, la sensibilité de LQE diminue. D'autre part, si w_p est trop petite, les fluctuations des valeurs de h feront changer la valeur du Prr_{N_i, N_j} ce qui affecte la stabilité du LQE.

Dans ce travail, la valeur de w_p est fixée à 10. Dans un temps T et après avoir transmis les w_p paquets à N_j , N_i réinitialise la valeur de w_p et mis à jour le résultat d'estimation de la Qualité de lien Prr_{N_i, N_j} comme indiqué dans l'équation (6.3):

$$Prr_{N_i, N_j} = \alpha \cdot Prr_{N_i, N_j} + (1 - \alpha) \cdot Prr_{N_i, N_j} \quad (6.3)$$

Avec :

α : C'est une constante, un nombre entre 0 et 1.

L'estimation de la qualité de lien peut être calculée côté émetteur contrairement au Prr qui est calculé côté récepteur, pour diminuer la quantité d'information de qualité de lien échangée entre les nœuds.

6.2.3 Qualité de Service au niveau de la couche MAC

Différenciation de services et allocation des slots TDMA

L'introduction de la priorité entre les données permet de réduire la complexité des solutions proposées, en servant les données différemment, afin d'atteindre les performances ciblées. Cette manière de traiter les données dans un réseau est communément nommée « différenciation de service ». Ce paradigme est fortement recommandé dans le contexte des RCSF. En effet, la différenciation de service est introduite d'abord au niveau de la couche application, par l'encodeur, et est ensuite respectée au niveau des couches inférieures. Par exemple, sur la base de la pertinence des données vidéo, le protocole de routage peut fournir des traitements différenciés pour les paquets, en n'atteignant par exemple une grande fiabilité pour des paquets de priorité élevée.

La différenciation de services est la méthode de base utilisée pour fournir la qualité de service dans les réseaux de capteurs sans fil. Afin d'appliquer la différenciation du trafic sur le réseau, nous présentons dans cette section le schéma de priorité d'un réseau avec des trafics de priorités différentes. Le modèle proposé peut prendre en charge deux classes principales de trafic, nommées : la classe Expedited Forwarding (EF), qui est affectée au trafic temps réel, et la classe Assured Forwarding (AF), qui est affectée aux classes de trafic non temps réel ou au trafic tolérant aux délais. En outre, chaque classe de trafic non temps réel peut être divisée en différents niveaux d'importance correspondant à leurs exigences en matière de fiabilité [115].

Nous considérons quatre types de classes de trafic, qui sont:

1. Classe EF (trafic temps réel).
2. AF1 (trafic non temps réel avec haute priorité)
3. AF2 (trafic non temps réel avec priorité moyenne)
4. AF3 (trafic non temps réel avec priorité faible)

Une file d'attente est attribuée à chaque classe de trafic. Le modèle de mise en file d'attente est représenté dans la figure 6.3, les ressources sont allouées aux différentes classes de trafic en fonction de leurs exigences de QoS dans le réseau.

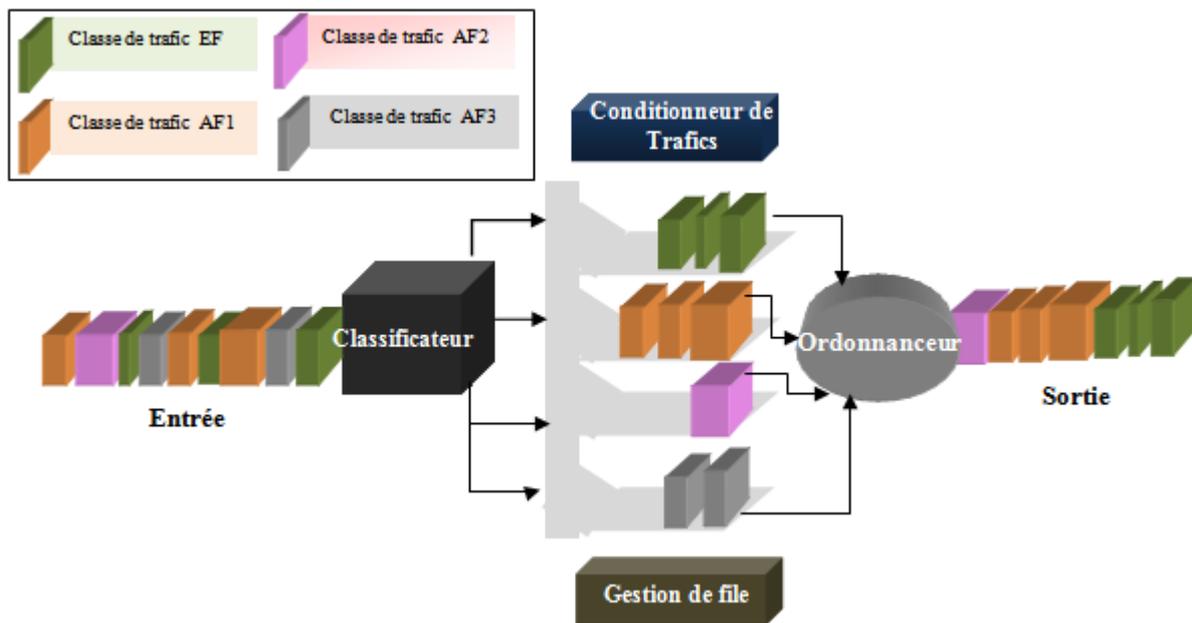


Figure 6.3 Classification de trafic au niveau de chaque Nœud.

Les protocoles de contrôle d'accès au médium (MAC) sont utilisés pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager simultanément un médium de communication. Leur but est de maximiser l'utilisation du canal avec un minimum d'interférences et de collisions. Le protocole MAC détermine le temps où un nœud atteint le médium pour tenter de transmettre, de contrôler ou de faire passer un paquet à un autre nœud ou à un ensemble de nœuds [117]. Les protocoles MAC avec Qualité de service se divisent en trois grandes familles : protocoles MAC avec contention, protocoles MAC sans contention et les protocoles MAC hybride. D'autres chercheurs préfèrent l'utilisation du concept de Cross-layer pour améliorer l'efficacité du standard.

Notre protocole est basé sur l'algorithme d'accès multiple par répartition de temps (TDMA). L'approche TDMA [67] est basée sur un multiplexage temporel c.-à-d. que les utilisateurs utilisent la même fréquence tout en occupant des slots de temps différents. Chaque

nœud utilise toute la bande passante allouée pour le système de transmission durant le slot (c'est lui seul qui occupe le support). Elle permet à plusieurs utilisateurs de partager le même canal en divisant l'accès en différents slots de temps. Chaque nœud accède au canal à son propre créneau horaire afin d'éviter la probabilité de collision et de réduire le temps d'attente moyen. Les protocoles MAC pour le réseau de capteurs sans fil offrent une QoS en réduisant le délai pour le trafic temps réel, c'est-à-dire que le nœud qui a un paquet temps réel à envoyer devrait préférentiellement accéder au support en premier.

Dans ce travail, nous supposons une stratégie TDMA idéale. Chaque nœud capteur du même cluster (intra-cluster node) est interrogé de transmettre des paquets de données au Cluster Head. Ensuite, le cluster Head (CH) attribue les slots TDMA en fonction de l'application de chaque nœud capteur intra-cluster. Le CH utilise ensuite un mécanisme d'ordonnancement de paquets selon les priorités basé sur l'approche TDMA pour attribuer des slots de temps.



Figure 6.4 Répartition de Slots TDMA.

TDMA peut également être modifié pour allouer les premiers slots de temps aux paquets temps réel. Chaque nœud source envoie des données à son voisin selon l'ordonnancement TDMA spécifié.

6.2.4 Qualité de service au niveau de la couche réseau

Dans cette couche, une table de voisinage statique (SRT) est créée en se basant sur les informations de routage. Le délai de transmission est estimé en se basant sur les informations provenant de la couche physique et de la couche MAC. De plus, le nœud satisfaisant les exigences de QoS est sélectionné comme le prochain nœud.

L'ensemble de nœuds voisins est défini comme un ensemble de nœuds situés dans la zone de communication du nœud courant. Comme le montre la figure 6.5, $\{N_j, N_k, N_l, N_m\}$ est l'ensemble de nœuds voisins du nœud N_i . La table de nœuds voisins statiques est définie comme un ensemble de nœuds voisins géographiquement plus proches de la destination pour la transmission de paquets.

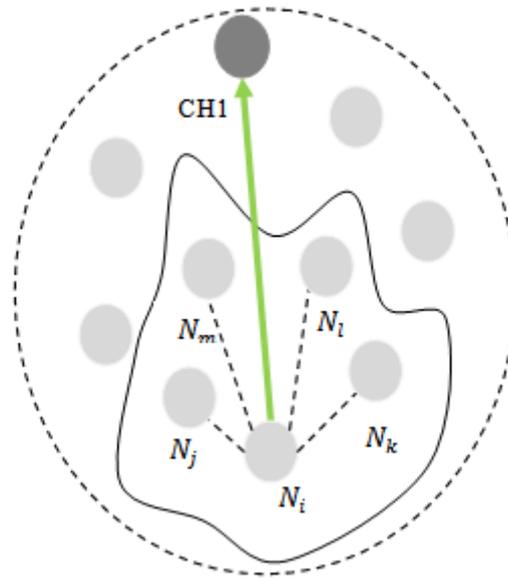


Figure 6.5 Les nœuds voisins du nœud N_i .

L'estimation du délai

L'estimation de délai vise à évaluer le délai entre un nœud et ses nœuds voisins. Supposant que le nœud N_j échange le délai de la couche MAC Tr_{N_j} et le nombre de paquets dans la file d'attente L_{N_j} avec son nœud voisin N_i par un message *hello* comme dans [118]. Pour les paquets temps réel, avec une priorité élevée, le délai dans lequel le nœud N_j est choisi comme un prochain saut de la chaîne de routage est noté par d_{N_i, N_j}^{EF}

d_{N_i, N_j}^{EF} Peut être exprimé comme suit:

$$d_{N_i, N_j}^{EF} = Tr_{N_j}^{EF} \cdot L_{N_j}^{EF} \quad (6.4)$$

Le meilleur chemin (saut prochain) est sélectionné en fonction des exigences de QoS du paquet [119]:

$$T_{hop} = \frac{T_{req}}{n_{max\ hop}} \quad (6.5)$$

Avec:

T_{req} : représente l'exigence de délai dans le RCSF.

T_{hop} : représente l'exigence de délai de chaque saut et $n_{max\ hop}$ est le nombre maximum de sauts de routage dans un RCSF.

L'algorithme de routage que nous avons utilisé pour sélectionner le prochain nœud voisin dans la chaîne est décrit ci-dessous:

Algorithme 1: Algorithme de Routage

Initialisation

N_i est prêt pour envoyer un paquet vers le CH

1: **Si** CH_1 est un nœud voisin du nœud N_i

2: CH_1 est sélectionné comme Nœud de routage

3: **Sinon**

4: $Neighbour_{N_i} = \Phi$ // Initialisation du $Neighbour_{N_i}$ (Les nœuds voisins du nœud N_i)

5: **Si** le paquet possède des exigences de QoS dans chaque saut T_{hop} // T_{hop} l'exigence de délai de chaque saut

6: **Pour** $N_j \in SRT_{N_i, CH_1}$ // SRT_{N_i, CH_1} la table des nœuds voisins du nœud N_i vers la destination CH_1

7: **Si** $d_{N_i, N_j}^{EF} < T$ // Si le délai du nœud N_j choisi comme prochain saut est inférieur à T délai.

8: $Neighbour_{N_i} = Neighbour_{N_i} \cup \{N_j\}$

9: **Si** $Neighbour_{N_i} = \Phi$

10: $Neighbour_{N_i} = \{N_j\}$

11: **Sinon**

12: $Neighbour_{N_i} = SRT_{N_i, N_j}$

13: **Finsi;**

14: **Sinon**

15: N_i sélectionne aléatoirement un nœud de routage du $Neighbour_{N_i}$

16: **Finsi;**

17: **Si** Le paquet est temps réel

18: mettre le paquet dans la file d'attente EF

19: **Sinon**

21: **Si** le paquet est Non- temps réel

22: **Si** La file d'attente n'est pas pleine

23: Mettre le paquet dans la file d'attente appropriée {AF1, AF2, AF3}

24: **Sinon**

25: Supprimer le paquet

26: **Finsi;**

27: **Finsi;**

Fin.

6.3 Évaluation des performances du protocole CLEEP-QoS

Cette section est dédiée à la discussion des différents scénarios de tests que nous avons effectués afin d'évaluer les performances de notre approche cross-layer. Les différents scénarios sont choisis, d'une part, pour mettre en évidence et prouver les limitations que nous avons identifiées et d'autre part, pour montrer l'efficacité des améliorations apportées par le protocole CLEEP-QoS.

Pour valider la solution proposée, nous avons effectué plusieurs tests à l'aide du simulateur de réseaux NS-2.34. Nous simulons un réseau de capteurs sans fil dans lequel chaque nœud peut avoir différentes classes de trafic: EF, AF1, AF2 et AF3.

6.3.1 Métriques de performances

Afin d'analyser les performances de notre protocole, nous considérons les métriques suivantes :

- *Délai de bout-en-bout d'un paquet* : le délai entre l'instant d'émission du paquet jusqu'à la réception du paquet.
- *Délai d'attente (Queuing delay)* : La durée pendant laquelle les paquets doivent attendre dans les files d'attente avant d'être servis.
- *Débit du système* : c'est le nombre de bits reçus par unité de temps.
- *PRR (pour Packet Reception Rate)* : Le taux de paquets reçus avec succès.
- *L'énergie consommée* : La quantité d'énergie consommée par les nœuds capteurs du réseau.

6.3.2 Résultats

La figure 6.6 montre la durée pendant laquelle les paquets doivent attendre dans les files d'attente correspondantes avant d'être servis. En raison de la différenciation de service, la classe de trafic AF1 a connu un délai de mise en attente plus long que celui de la classe du trafic EF qui a toujours un délai d'attente égal à zéro, en revanche, le délai d'attente des paquets de la classe AF3 est le plus élevé. Cela indique que la classe du trafic temps réel (EF) est toujours servie en premier.

La figure 6.7 illustre l'utilisation des différentes files d'attente par les paquets. Il est clairement observable que la file EF est la moins utilisée par rapport aux autres files, ce qui est justifié par la non attente des paquets temps réel au niveau de la file EF.

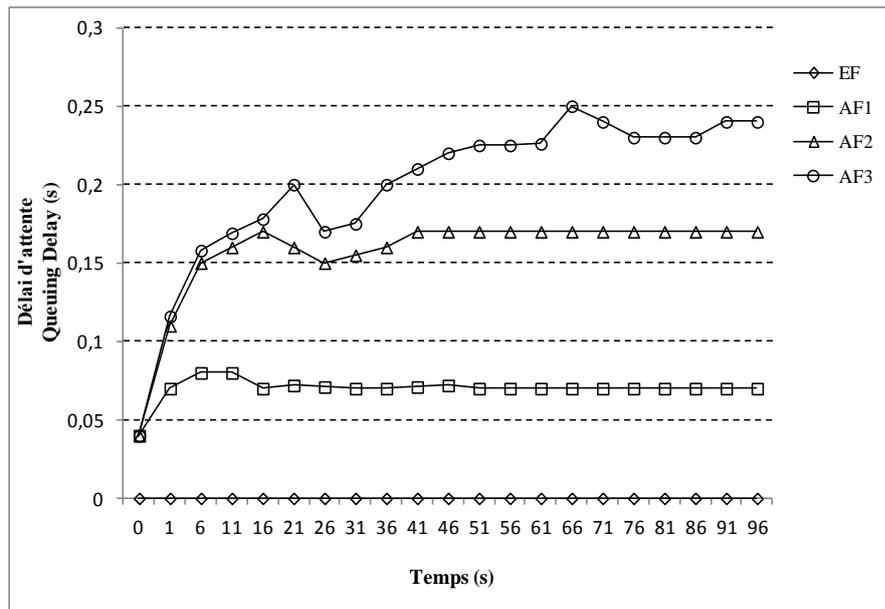


Figure 6.6 Délai d'attente de chaque classe de trafic.

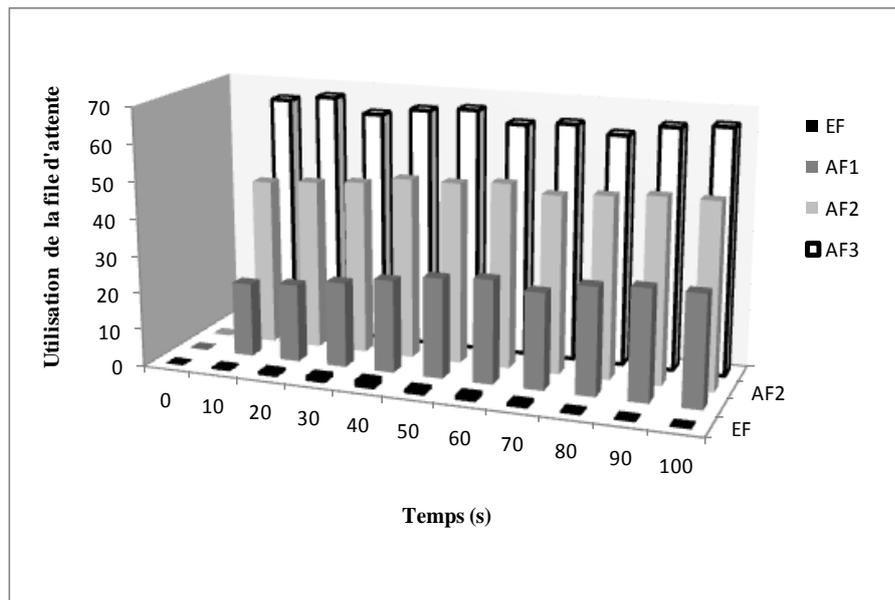


Figure 6.7 Utilisation des files d'attentes.

L'utilisation de la bande passante pour les nœuds ayant des données de la classe EF, AF1, AF2 et AF3 est présentée dans la figure 6.8. On constate cependant que les trafics prioritaires ont un délai de bout en bout réduit et des débits garantis quand une gestion multicouche est utilisée.

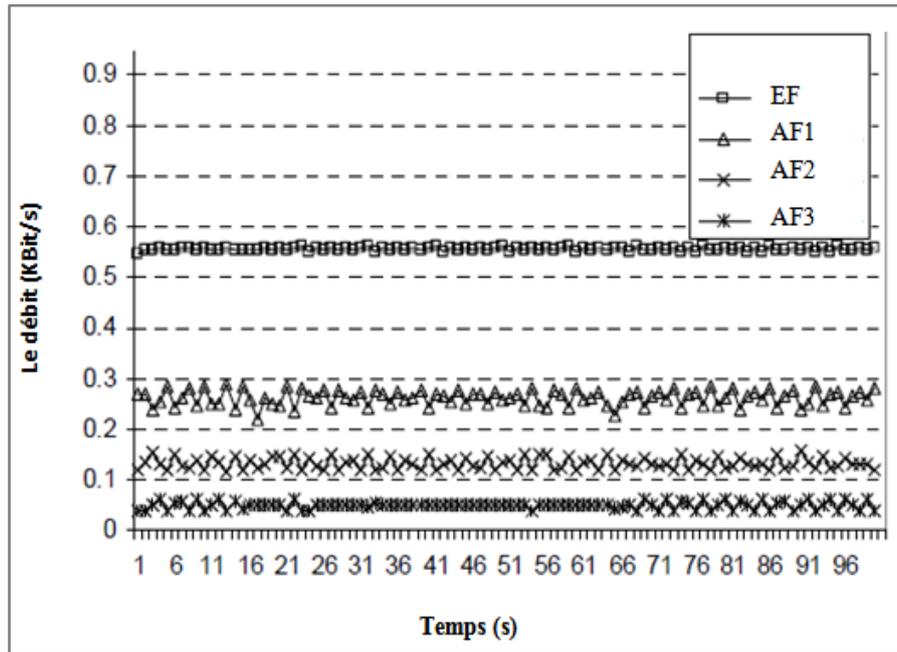


Figure 6.8 Débits mesurés en fonction du temps.

La figure 6.9 montre le délai mesuré pour les paquets prioritaires dans les deux protocoles CLEEP-QoS et HEEP, en effet nous pouvons constater que les performances du protocole proposées sont toujours les meilleures. L'utilisation de la bande passante pour les nœuds ayant des données temps-réel avec haute priorité dans les cas des protocoles CLEEP-QoS et HEEP est présentée dans la figure 6.10, nous pouvons également observer que le protocole CLEEP-QoS utilise la bande passante de manière plus efficace que le protocole HEEP. Cela vient de la capacité du premier de garantir la délivrance des données prioritaires dans le réseau sans fil.

Comme illustré dans la figure 6.11 Le taux moyen de paquets de haute priorité (HP Packet) reçu (PRR) dans le cas du protocole CLEEP-QoS est le plus élevé. D'autre part, le taux de paquets temps réel reçus dans le cas des protocoles MMSPEED et DARA est faible par rapport à notre protocole, ce qui signifie que les performances en QoS des deux protocoles MMSPEED et DARA sont limitées. Les résultats obtenus par le protocole SPEED ne sont pas modifiés lors de l'augmentation du nombre de paquets EF. Pour le protocole CLEEP-QoS, au niveau de la couche physique, nous évaluons la qualité du lien; cette information d'estimation est utilisée par la couche réseau pour sélectionner le nœud qui satisfait la performance de bout-en-bout de la QoS pour la transmission multi-saut. Cette estimation aidera à améliorer les performances du protocole proposé. Les résultats obtenus montrent que notre approche dépasse clairement les autres protocoles dans l'amélioration de la fiabilité de bout-en-bout.

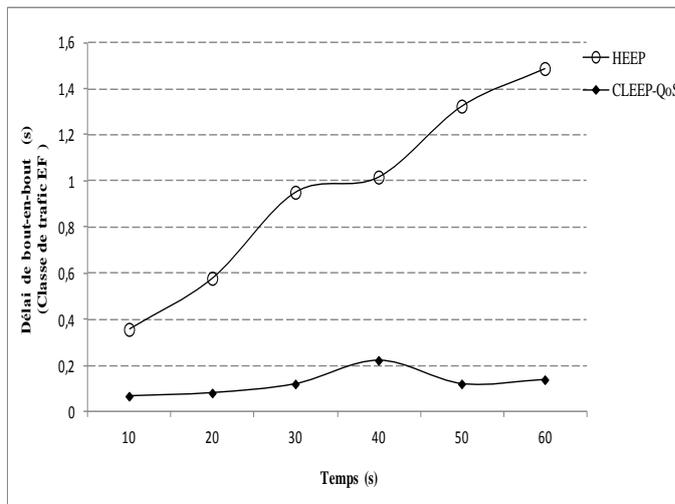


Figure 6.9 Comparaison des délais dans le cas de CLEEP-QoS et HEEP

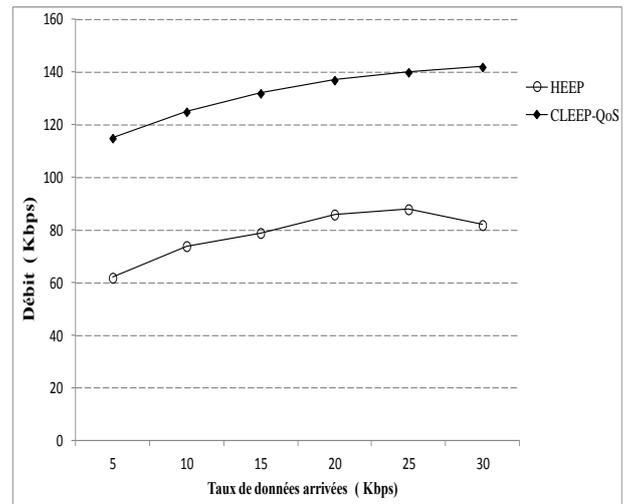


Figure 6.10 Comparaison des débits dans le cas de CLEEP-QoS et HEEP

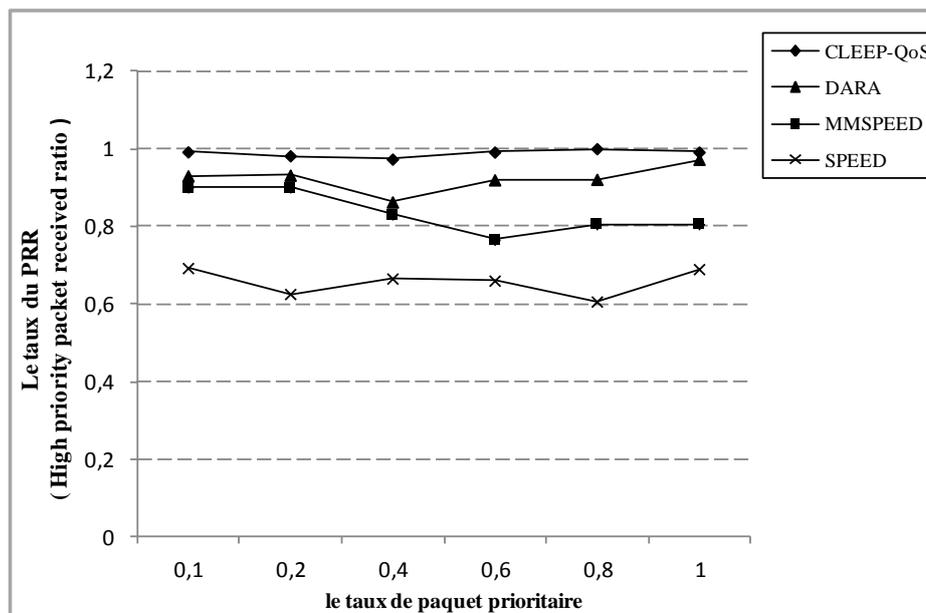


Figure 6.11 Le taux de paquets de haute priorité reçus (PRR).

La figure 6.12 expose le délai moyen de bout-en-bout du trafic de haute priorité: le délai engendré par le protocole CLEEP-QoS est réduit par rapport à celui du protocole DARA et beaucoup inférieur que les deux autres protocoles (MMSPEED et SPEED). L'algorithme de routage utilisé par CLEEP-QoS afin de sélectionner les routes optimales en se basant sur les informations de qualité des liens fournies par la couche physique diminue le délai des paquets de haute priorité.

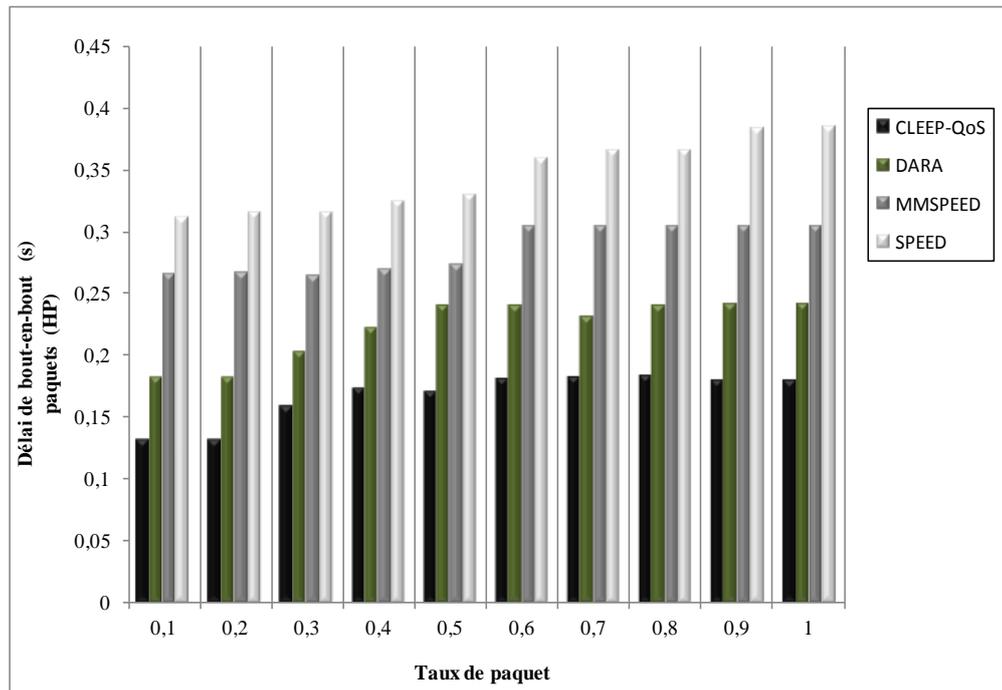


Figure 6.12 Délai du trafic (HP) versus le taux de paquets.

Afin de démontrer l'efficacité énergétique de notre protocole, nous avons mesuré la consommation d'énergie par paquet, ce qui nous a donné les résultats tel qu'illustré dans la figure 6.14. Le protocole CLEEP-QoS garantit une consommation uniforme d'énergie entre les nœuds capteurs du réseau en réduisant les distances de transmission entre les nœuds et leurs CHs. De plus, l'agrégation des données au niveau des chaînes de transmission, réduit la quantité des données transmises aux CHs, et permet de répartir uniformément la charge entre les nœuds du cluster. Les résultats montrés dans la figure 6.14 confirment que notre protocole est plus efficace énergétiquement par rapport aux protocoles SPEED, MMSEED et DARA.

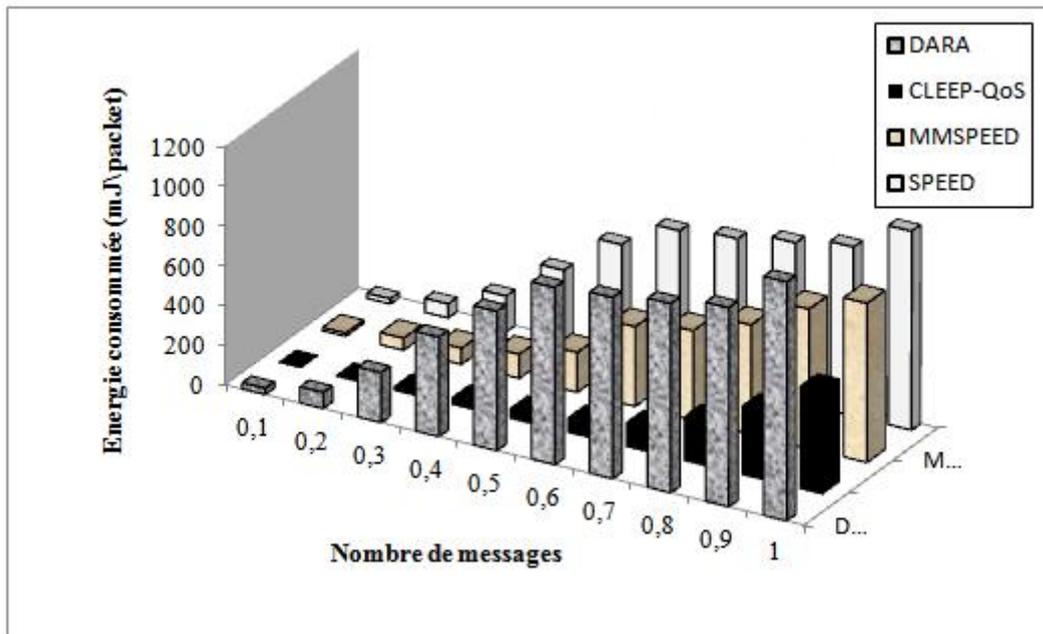


Figure 6. 14 Energie consommée par paquet.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une solution inter-couches efficace en énergie pour prolonger la vie du réseau, sous la contrainte d'assurer une qualité de service dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans notre proposition, le problème de qualité de service est abordé avec une nouvelle stratégie dans laquelle l'interaction cross-layer est pleinement exploitée. Notre approche consiste à produire un nouveau protocole cross-layer basé sur l'interaction entre plusieurs couches du modèle OSI (couche physique, couche MAC, couche réseau) afin d'améliorer les performances du réseau et de garantir un niveau suffisant de QoS avec les coûts les plus faibles possibles. Les résultats de l'évaluation montrent que notre protocole CLEEP-QoS présente une bonne solution pour fournir de la qualité de service et réduire la consommation énergétique dans le réseau de capteurs sans fil par rapport à d'autres protocoles tels que SPEED, MMSEED et DARA.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil commencent à envahir la vie quotidienne avec des applications diverses pour améliorer notre confort et notre sécurité. Les capteurs sans fil autonomes offrent un avantage de coût et de facilité de déploiement puisqu'ils embarquent un système de communication sans fil et sont souvent alimentés par une batterie. Cependant, cet avantage impose des contraintes fortes en ce qui concernent les protocoles développés. En effet, ils doivent prendre en compte la consommation d'énergie, les pannes que ce soit temporaires ou définitives et la facilité de passage à l'échelle. A toutes ces contraintes s'ajoutent celles sur les trafics générés par des applications comme par exemple le délai, le débit, la fiabilité, etc. La coexistence de plusieurs types de trafics dans un réseau de débit faible crée un besoin de différenciation de service afin que les données les plus importantes puissent être traitées avec priorité.

L'assurance de la qualité de service dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil représente un défi de recherche très important, plus particulièrement dans ce type de réseaux qui sont caractérisés par les contraintes des nœuds RCSF, et dans lesquels l'économie d'énergie est une question axiale.

Dans cette thèse, nous avons proposé deux protocoles de communications. Le premier consiste en un protocole avec qualité de service nommé QoS-HEEP (Hybrid Energy Efficient Protocol with Quality of Service for WSN), basé sur le mécanisme de différenciation de service afin de distinguer entre les deux types de trafics temps réel et non temps réel. Notre protocole ajuste dynamiquement le degré d'agrégation des données au niveau de chaque nœud capteur en fonction de la charge du réseau par l'utilisation d'un mécanisme de rétrocontrôle « feedback mechanism for data aggregation », ce mécanisme est basé sur deux types d'agrégation de données: l'agrégation avec perte et sans perte.

Notre deuxième contribution a consisté à développer un protocole de communication avec qualité de service et économique en énergie nommé CLEEP-QoS, qui exploite l'interaction des trois couches adjacentes réseau, MAC et physique. Au niveau de la couche physique, l'évaluation de la qualité du lien est effectuée, cette information est utilisée par la couche réseau pour sélectionner le prochain nœud qui permet d'optimiser les performances de QoS. Tandis que les mécanismes de chaque

couche restent intacts. Par ailleurs, ce protocole repose sur la coopération de la couche MAC afin de garantir la différenciation de service, en donnant aux paquets de haute priorité de plus grandes chances d'accéder au support partagé. Les résultats expérimentaux démontrent que nos solutions offrent un bon niveau de performances en termes de QoS, tout en assurant un faible niveau de consommation d'énergie.

Bien que les contributions proposées soient assez efficaces, les solutions obtenues ne sont pas optimales. Il existe plusieurs points qui peuvent être améliorés en perspective. Dans un premier temps, nous avons constaté que les mesures expérimentales effectuées dans cette thèse ont souligné plusieurs pistes d'optimisation nécessaires. La différenciation de service seule n'est pas suffisante pour offrir de la QoS, il faut ajouter à cela d'autres mécanismes. Le plus important d'entre eux étant l'utilisation des approches bio-inspirées comme l'optimisation par essaim particulaire (PSO), optimisation par colonies de fourmis etc. Afin de doter le réseau de capteurs plus d'intelligence et d'optimiser certaines phases de notre protocole.

Ensuite, il paraît essentiel d'augmenter l'échelle du réseau, pratiquement toutes les solutions de QoS proposées ont été testées sur des réseaux contenant quelques centaines de nœuds capteurs.

Notre protocole CLEEP-QoS pourra être amélioré et mis à jour par la prise en compte des effets induits par certaines fonctionnalités de contrôle, comme par exemple, le contrôle de files d'attente, le contrôle de la topologie et la taille de l'antenne radio. Nos protocoles peuvent aussi être étendus à des nœuds capteurs hétérogènes.

Bibliographie

- [1]. Cobo campo, L. (2011) ‘Gestion de la qualité de service et planification optimale de réseaux de capteurs multimédia sans fil’, Thesis Montréal university, août 2011.
- [2]. Zakaria, A. (2004) ‘Quality of Service in Wireless Sensor Networks’. IEEE. pp. 579 – 581.
- [3]. Tilak, S., Abhu-Gazhaleh, N. and Heinzelman, W. R. (2002) ‘A taxonomy of wireless micro-sensor network models’, ACM SIGMOBILE Mobile Comp. Commun. Rev., vol. 6, No. 2, April, pp. 28- 36.
- [4]. Estrin, D., Girod, L., Pottie, G., and Srivastava, M. (2001) ‘Instrumenting the world with wireless sensor networks’, In International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001), Salt Lake City, Utah, May 2001.
- [5]. Toral, H., Hidoussi F., Boubiche, D.E., Bilami, A., Voznak, M. and Jakovlev, S. (2014) ‘Wireless Sensor Networks’, Encyclopedia of Information Science and Technology: 3rd Ed, Edited by Mehdi Khosrow, IGI Global Publishers, USA, Chapter 575, pp. 5815-5824.
- [6]. Aswale, S. and Ghorpade, V.R. (2015) ‘Survey of QoS Routing Protocols in Wireless Multimedia Sensor Networks’, Journal of computer Networks and communications, Vol. 2015. No. 17, pp. 1-29.
- [7]. Mcouat, J. (2013) ‘Wireless Sensor Networks : Principles, Design and Applications’. Springer Science & Business Media.
- [8]. Boubiche, D. E. (2013) ‘Une approche Inter-Couches (cross-layer) pour la Sécurité dans les RCSF’, Université de batna, thèse de Doctorat en Sciences en Informatique.
- [9]. GAO, T., GREENSPAN, D., WELSH, M. and al. (2005) ‘Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network’, 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE-EMBS, pp. 102–105.
- [10]. Fdili, O., A. (2015) ‘Optimisation multicritères de la qualité de service dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil’, PHD thesis, University of

VALENCIENNES and HAINAUT-CAMBRESIS.

- [11]. Akyildiz, I. F. and Vuran, M. C. (2010) 'Wireless sensor networks', John Wiley & Sons. Vol. 4. (2010)
- [12]. Akyildiz, I. F., Pompili, D. and Melodia, T. (2005) 'Underwater acoustic sensor networks : research challenges. Ad hoc networks', 3(3), pp. 257–279.
- [13]. Akyildiz, I. F. and Stuntebeck, E. P. (2006) 'Wireless underground sensor network: Research challenges. Ad Hoc Networks', 4(6), pp. 669–686.
- [14]. Yang, G.-Z. and Yacoub, M. (2006). Body sensor networks. Springer. edition (15 May 2006), 494 pages
- [15]. Hall, P., Hao, Y., Nechayev, Y., Alomainy, A., Constantinou, C., Parini, C., Kamarudin, M., Salim, T., Hee, D., Dubrovka, R., Owadally, A., Song, W., Serra, A., Nepa, P., Gallo, M. and Bozzetti, M. (2007) 'Antennas and propagation for on-body communication systems', Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 49(3), pp. 41–58.
- [16]. Hertleer, C., Hertleer, C., Rogier, H. and Vallozzi, L. (2009) 'Off-body communication for protective clothing In Wearable and Implantable Body Sensor Networks. BSN', Sixth International Workshop on Wearable & Implantable Body Sensor Networks Conference (BSN 2009). p.301-304
- [17]. Akyildiz, I. F., Melodia, T. and Chowdury, K. (2007) 'Wireless multimedia sensor networks : A survey', Comput Netw, Vol.51, pp. 921–960.
- [18]. Hui, Z., and Knightly, E.W. (1999) 'Integrated and differentiated services for the internet'. IEEE Network, 13(5).
- [19]. BenGuedria, S., Frigon, J.F. and Sanso, B. (2012) 'An Intelligent High Availability AMC Design', In IEEE Radio Wireless Week, Santa Clara, CA, USA, January 2012.
- [20]. Peuhkuri, M. (1999) 'IP Quality of Service. Technical Report Helsinki University of Technology', Laboratory of Telecommunications Technology.
- [21]. Soni, S. and, Srivastava, S. (2016) 'Survey of Quality of Service Routing Protocol in MANET', International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Vol. 136, No.13.
- [22]. Y.1541, (2005) 'Network Performances Objectives for IP-based Services', ITU-T.
- [23]. Babiarz, J., Chan, K. and Baker, F. (2006) 'Configuration Guidelines for DiffServ

Service Classes’, RFC 4594.

- [24]. NEFZI, B. (2011) ‘Mécanismes auto-adaptatifs pour la gestion de la Qualité de Service dans les réseaux de capteurs sans fil’, LORIA, Projet TRIO, 21 septembre 2011.
- [25]. Dugeon, O. (2008) ‘Architectures des réseaux pour le contrôle de la QoS’, Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches.
- [26]. Braden, R., Clark, D. and Shenker, S. (1994) ‘Integrated services in the internet architecture: an overview’, RFC 1633.
- [27]. Braden, R., Zhang, L. Berson, S., Herzog, S. and Jamin, S. (1997) ‘Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification’, RFC 2205 (Updated by RFCs 2750, 3936, 4495).
- [28]. Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z. and Weiss, W. (1998) ‘An Architecture for Differentiated Service’, RFC 2475 (updated by RFC 3260).
- [29]. Toumi, L. (2002) ‘Algorithmes et mécanismes pour la qualité de service dans des réseaux hétérogènes’, Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, Français.
- [30]. Heinanen, J., Baker, F., Weiss, W. and Wroclawski, J. (1999) ‘Assured Forwarding PHB Group’, RFC 2597 (Updated by RFC 3260).
- [31]. Davie, B. et al. (2002) ‘An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior)’, RFC 3246.
- [32]. Rosen, E., Viswanathan, A. and Callon, R. (2001) ‘Multiprotocol Label Switching Architecture’, RFC 3031.
- [33]. Durham, D., Boyle, J., Cohen, R., Herzog, S., Rajan, R. and Sastry, A. (2000) ‘The COPS (Common Open Policy Service) Protocol’, RFC 2748.
- [34]. Yavatkar, R., Pendarakis, D. and Guerin, R. (2000) ‘A Framework for Policy-based Admission Control’, RFC 2753.
- [35]. Sahita, R., Hahn, S., Chan, K. and McCloghrie, K. (2003) ‘Framework Policy Information Base’, RFC 3318.
- [36]. Chan, K., Sahita, R., Hahn, S. and McCloghrie, K. (2003) ‘Differentiated Services Quality of Service Policy Information Base’, RFC 3317.
- [37]. Hancock, R., Karagiannis, G., Loughney, J. and Van den Bosch, S. (2005) ‘Next

Steps in Signaling (NSIS): Framework', RFC 4080.

- [38]. Schulzrinne, H. and Hancock, R. (2009) 'GIST: General Internet Signalling Transport', draftietf-nsis-ntlp-16.
- [39]. Beder, A., Westberg, L., Karagiannis, G., Kappler, C. and Phelan, T. (2005) 'RMD-QOSM - The Resource Management in Diffserv QOS Model', draft-ietf-nsis-rmd-13.txt.
- [40]. Lee, S.B. and Campbell, A. T. (1998) 'INSIGNIA : In-band signaling support for QoS in mobile ad hoc networks', In 5th Int. Workshop on Mobile Multimedia Communication (MoMuc'98), Berlin, Germany.
- [41]. Xiao, H., Seah, K. G. , Lo, A. and Chua, K. C. (2000) 'A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks', Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000, VTC 2000-Spring Tokyo, IEEE : 51st, Vol. 1, pp. 445 -449.
- [42]. Gahng-Seop, A., Andrew, T., Campbell, A. V. and Li-Hsiang S. (2002) 'SWAN : Service Differentiation in Stateless Wireless Ad Hoc Networks', Proc. IEEE INFOCOM'2002, New York, New York.
- [43]. Meraihi, R. (2005) 'Quality of service support and topology control in mobile ad hoc networks', Thèse de doctorat, Télécom ParisTech.
- [44]. Seah, W. K. G. and Tan, H.-X. (2008) 'Quality of Service in Mobile Ad Hoc Networks', in Encyclopedia of Internet Technologies and Applications, M. Freire and M. Pereira [Eds.], IGI-Global, 20081, pp. 441-448.
- [45]. Badis, H. (2011). 'Etude et conception d'algorithmes pour les réseaux mobiles et ad-hoc', thesis, University of Paris Sud, Paris XI, Oct 2011.
- [46]. Sinha, P., Sivakumar, R. and Bharghavan, V. (1999) 'CEDAR : a core extraction distributed ad hoc routing algorithm', IEEE Journal on Selected Areas in Communications, special issue on Wireless Ad Hoc Networks, Vol. 17. No.8, pp.1454–1465.
- [47]. Chaudet, C. and Guérin Lassous, I. (2002) 'BRuIT : Bandwidth Reservation under InTerferences influence', in European Wireless, Florence, Italy, pp. 466–472.
- [48]. Chen, S. and Nahrstedt, K. (1999) 'Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks', in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, pp. 1488–1504.
- [49]. Chen, Y.S. and Ko, Y.-W. (2004) 'A Lantern-Tree Based QoS on Demand Multicast Protocol for A wireless Ad hoc Networks', IEICE Transaction on Communications, vol. E87-B, pp. 717-726.

- [50]. Bamatraf, A., Latiff, MSBINABD., Coulibaly, Y. and Khasawneh, A.M. (2015) 'Review of quality of service in routing protocols for wireless sensor networks', *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, Vol. 74, No. 3, pp. 310-320.
- [51]. Chen, D. and Varshney, P.K. (2004) 'QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey'. *International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*.
- [52]. Mbowe, J. E., and Oreku, G. S. (2014) 'Quality of Service in Wireless Sensor Networks'. *Journal of Wireless Sensor Network*, 6(2), pp.19-26.
- [53]. El Gholami, K. (2015) 'La gestion de la qualité de service temps-réel dans les réseaux de capteurs sans fil', université blaise pascal - Clermont II, thèse en cotutelle avec l'université chouaib doukkali - El Jadida, 29 May 2015.
- [54]. Stankovic, T., JA, Lu, C. and Abdelzaher, T. (2003) 'SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks', In: *Proceedings of the international conference on distributed computing systems*. Providence (RI).
- [55]. Sanli, H. O., Cam, H., and Cheng, X. (2004) 'EQos: An energy efficient QoS protocol for wireless sensor networks', In the *Proc. of 2004 Western Simulation MultiConference (WMC'04)* (San Diego, January 2004).
- [56]. Razzaque, M. A., Alam, M. M., Or-Rashid, M. M. and Hong, C. S. (2008) 'Multi-Constrained QoS Geographic Routing for Heterogeneous Traffic in Sensor Networks', *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 91, No.B(8), pp.2589–2601.
- [57]. Akkaya, K., and Younis, M. (2003) 'An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks', *23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2003.
- [58]. Reason, J. M., and Rabaey, J. M. (2004) 'A study of energy consumption and reliability in a multi-hop sensor network', *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun.*
- [59]. Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., and Pottie, G. J. (2000) 'Protocols for self organization of a wireless sensor network'. *IEEE Personal Communication Magazine* 77 (October 2000).
- [60]. Stann, F., and Heidemann, J. (2003) 'RMST: Reliable data transport in sensor networks', In *Proceedings of the First International Workshop on Sensor Net Protocols and Applications* (Anchorage, Alaska, USA, April 2003), IEEE.
- [61]. Aykut, Yigite, M., 1, Ozlem Durmaz Incel and Cem Ersoy. (2011) 'QoS-aware MAC protocols for wireless sensor networks: A survey', *Journal of Computer*

Networks, Vol. 55(2011) pp.1982-2004.

- [62]. Vuran, M. and Akyildiz, I. (2009) 'Error control in wireless sensor networks: a cross layer analysis', IEEE/ACM Transactions on networking. Vol.17, No.4, pp.1186-1199.
- [63]. Wei Ye, J. Heidemann et D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. IEEE INFOCOM New York, Vol. 2, pp. 1567-1576.
- [64]. Dam, D.V and Langendoen, K. (2003) 'An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks', In SenSys '03 : Proceedings of the 1st ACM international conference on Embedded networked sensor systems, New York, NY, USA.
- [65]. Ergen, S.C and X Varaiya, P. (2002) 'PEDAMACS: Power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks', IEEE Transactions on Mobile Computing. Vol. 5, No.7, pp. 920-930.
- [66]. Injong Rhee, A., Aia, W.M., Min, J and Sichitiu, M.L. (2008) 'Z-MAC : A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks', Networking, IEEE/ACM.
- [67]. Macedo, M., Grilo, A. and Nunes, M. (2009) 'Distributed latency energy minimization and interference avoidance in TDMA wireless sensor networks', Computer Networks, Vol. 53, No. 5, pp.569–582.
- [68]. BEN NACEF, A. (2011) 'Relais coopératifs dans un réseau de capteurs : performances limites et stratégies', thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- [69]. Kleinrock, L.F. and Tobagi, A. (1975) 'Packet switching in radio channels: Part I—carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics', IEEE Transactions on Communications. Vol. 23, No.12, pp. 1400–1416.
- [70]. Nguyen, K., Nguyen, T., Chaing, C.K., Motani, M. (2006) 'A prioritized MAC protocol for multihop, event-driven wireless sensor networks', in: First International Conference on Communications and Electronics, ICCE'06.
- [71]. Saxena, N., Roy, A., and Shin, J. (2008) 'Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol for wireless multimedia sensor networks', journal of Computer Networks. Vol.52. No.13, pp. 2532- 2542.
- [72]. Firoze, A., Ju, L. and Kwong, L. (2007) 'PR-MAC a priority reservation MAC protocol for wireless sensor networks', in: Proceedings of ICEE '07: International Conference on Electrical Engineering.
- [73]. Liu, Z. and Elhanany, I. (2006) 'RL-MAC: A QoS-aware reinforcement learning

- based MAC protocol for wireless sensor networks’, in: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC’06.
- [74]. Liu, Y., Elhanany, I. and Qi, H. (2005) ‘An energy-efficient QoS-aware media access control protocol for wireless sensor networks’, in: IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference.
- [75]. Kim, H. and Min, S.-G. (2009) ‘Priority-based QoS MAC protocol for wireless sensor networks’, in: IPDPS ’09: Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA.
- [76]. Yoon, S., Qiao, C., Sudhaakar, R.S. , Li, J. and Talty, T. (2007) ‘QoMOR: A QoS-aware MAC protocol using optimal retransmission for wireless intravehicular sensor networks’, in: Mobile Networking for Vehicular Environments, 2007, pp. 121-126.
- [77]. Slama, I., Shrestha, B., Jouaber, B., and Zeghlache, D. (2008) ‘A hybrid MAC with prioritization for wireless sensor networks’, in: 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN.
- [78]. Yigitel, M.A. , Durmaz Incel, O. and Ersoy, C. (2010) ‘Diff-MAC: a QoS-aware MAC protocol with differentiated services and hybrid prioritization for wireless multimedia sensor networks’, in: Proceedings of the 6th ACM workshop on QoS and security for wireless and mobile networks, Q2SWinet’10, Bodrum, Turkey.
- [79]. Baroudi, U. (2007) ‘EQoS: energy and QoS aware MAC for wireless sensor networks’, in: 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications, ISSPA.
- [80]. Suriyachai, P., Roedig, U. and Scott, A. (2009) ‘Implementation of a MAC protocol for QoS support in wireless sensor networks’, in: PERCOM ’09: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA.
- [81]. Caccamo, M., Zhang, L.Y. , Sha, L. and Buttazzo, G. (2002) ‘An implicit prioritized access protocol for wireless sensor networks’, In Real-Time Systems Symposium.
- [82]. Cano, C., Bellalta, B., Barcelo, J. and Sfairopoulou, A. (2009) ‘A novel MAC protocol for event-based wireless sensor networks: improving the collective QoS’, in: H. van den Berg, G.J. Heijenk, E. Osipov, D. Staehle (Eds.), *Wired/Wireless Internet Communications (WWIC)*, Lecture Notes in Computer Science, Springer.
- [83]. Jeong, J., Kim, J., Cha, W., Kim, H., Kim, S. and Mah, P. (2010) ‘A QoS-aware data aggregation in wireless sensor networks’, in: The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT).

- [84]. Fapojuwo, A.O. and Cano-Tinoc. A. (2009) ‘Energy Consumption and Message Delay Analysis of QoS Enhanced Base Station Controlled Dynamic Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks’, *IEEE Transaction On Wireless Communications*, Vol. 8, No. 10, pp. 5366-5374.
- [85]. Van, L., Hoesel, P. and Havinga, A. (2004) ‘lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks’, in: *INSS’ 04: Proceedings of the 1st International Conference on Networked Sensing Systems*, Tokyo, Japan.
- [86]. Su, W. and Lim, T. L. (2006) ‘Cross-Layer Design and Optimization for Wireless Sensor Networks’, in *Seventh ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*, 2006. SNPD 2006,2006, pp. 278-284.
- [87]. NIVOR, F. (2009) ‘Architecture de Communication pour les Applications Multimédia Interactives dans les Réseaux Sans Fil’, *Doctorat de l’université de Toulouse*.
- [88]. Bae, S.Y., Sung-Keun Lee and Kyoung-Wook Park. (2013) ‘Cross-Layer QoS Architecture with Multipath Routing in Wireless Multimedia Sensor Networks’, *International journal of smart home*, May 2013, vol.7, No. 3, pp. 219-226.
- [89]. Louazani, A. (2015) ‘Sécurisation d’un protocole inter-couches pour les réseaux LR-WPAN’, *thèse de doctorat, université d’Oran*.
- [90]. Ruiz, J., Gallardo, JR., Villasenor-Gonzalez, L., Makrakis, D., Mouftah, HT. (2009) ‘QUATTRO: QoS-capable Cross-layer MAC Protocol for Wireless Sensor Networks’, *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Global Telecommunications*, Honolulu, USA, November 30 – December 4, 2009.
- [91]. Ruiz, J., Gallardo, J.R., Makrakis, D., Villasenor-Gonzalez, L. and Mouftah, H.T. (2011) ‘Cross-layer medium access control protocol with quality-of-service guarantees for wireless sensor networks’, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. Vol. 2011, No. 179.
- [92]. Marco, P.Di., Park, P., Fischione, C. and Johansson, K.H. (2010) ‘TRENd: a timely, reliable, energy-efficient and dynamic WSN protocol for control applications’, *IEEE International Conference on communications (ICC’2010)*.
- [93]. Francesco, M. Di., Anastasi, G., Conti, M., Das, S. K. and Neri, V. (2011) ‘Reliability and Energy-Efficiency in IEEE 802.15.4/ZigBee Sensor Networks: An Adaptive and Cross-Layer Approach’, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no 8, pp. 1508-1524.
- [94]. Liu, S., Bai, Y., Sha, M., Deng, Q., and Qian, D. (2008) ‘CLEEP: A Novel Cross-

Layer Energy-Efficient Protocol for Wireless Sensor Networks', in: proceeding of the Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, IEEE WiCOM, 2008.

- [95]. Changsu Suh, Young-Bae Ko, and Dong-Min Son. (2006) 'An Energy Efficient Cross-Layer MAC Protocol for Wireless Sensor Networks', APWeb'06 Proceedings of the 2006 international conference on advanced web and network technologies, and applications ages pp.410-419. springer-verlag Berlin, Heidelberg.
- [96]. Melodia, T. and Akyildiz, IF. (2010) 'Cross-layer QoS-aware communication for ultra wide band wireless multimedia sensor networks', IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 28, No. 5, pp.653–63.
- [97]. Mendes, L.D.P. and Rodrigues J.J.P.C. (2010) 'A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks', journal of Network Computer Applications, Vol. 2010.
- [98]. Fang, W.W., Liu, Z. and Liu, F. (2012) 'a cross-layer protocol for reliable and efficient communication in wireless sensor networks', International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC. Vol.8, No.10(B).
- [99]. Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H. (2002) 'An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro sensor Networks', IEEE Transactions on the wireless communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670.
- [100]. Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H. (2000) 'Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks', IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [101]. Lindsey, S. and Raghavendra, C. (2002) 'PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems', IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol. 3, pp. 1125-1130.
- [102]. Boubiche, D. and Bilami, A. (2011) 'HEEP (Hybrid Energy Efficiency Protocol) based on chain clustering', International Journal of Sensor Networks, Vol. 10, No 1/2, pp. 25-35.
- [103]. Tan, W.L., Yue, O.C., and Lau, W.C. (2006) ' Performance Evaluation of Differentiated Services Mechanisms Over Wireless Sensor Networks', In Proceedings of Vehicular Technology Conference,VTC-2006 fall. 2006 IEEE 64 th, pp. 1-5.
- [104]. Eui-Jik, K., Meejoung, K., Sung-Kwan, Y., Seokhoon, C., and Chul-Hee, K. (2007) 'Priority-based service differentiation scheme for IEEE 802.15.4 sensor

networks', AEU: International Journal of Electronics and Communications, 61(2), pp.69-81.

- [105]. Yaghmaee, M. H. and Adjeroh, D. (2009) 'A Model for Differentiated Service Support in Wireless Multimedia Sensor Networks', IEEE February 5, 2009.
- [106]. Abdelzaher, T., He, T. and Stankovic, J. (2004) 'Feedback Control of Data Aggregation in Sensor Networks', In Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, December 14-17, 2004 Atlantis, Paradise Island, Bahamas.
- [107]. Boubiche, D.E., Boubiche, S., Bilami, A., and Toral, H. (2014) 'Feedback Control for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: A Survey', Network and electronic commerce research conference (NAEC 2014), pp. 155-162, Trieste, Italy.
- [108]. Bourmada, A. and Bilami, A. (2015) 'Hybrid Energy Efficient Protocol with Service Differentiation for QoS Provisions in Multi-Hop WSNs', International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS), 6(2), pp. 27-47.
- [109]. Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L. et al. (2012) 'Radio link quality estimation in Wireless sensor networks: a survey', ACM Transactions on Sensor Networks, 8(4), article 34.
- [110]. Fall, K. and Varadhan, K. (2002) 'NS Notes and Documentation'. The VINT Project.
- [111]. Altman, E. and Jimenez, T. (2003) 'NS Simulator for beginners'. Technical Report, Univ. Los Andes, Merida, Venezuela & Sophia-Antipolis, France.
- [112]. Rachedi, A., Lohier, S., Cherrier, S. and Salhi, I. (2010) 'Wireless Network Simulators Relevance Compared to a Real Testbed in Outdoor and Indoor Environments', in Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, New York, NY, USA, 2010, pp. 346–350.
- [113]. Bourmada, A. and Bilami, A. (20XX) 'Cross-Layer Energy Efficient Protocol for QoS Provisioning in Wireless Sensor Network', International Journal of Systems, Control and Communications (IJSCC), In press, Vol x, No x, pp. xx-xx.
- [114]. Tariq, S. (2005) 'MAC Algorithms in Wireless Networks', Master's thesis, Umea University", Sweden, www.cs.umu.se/education/examina/Rapporter/ShoaibTariq.pdf.
- [115]. Ezdiani, S. and Al-Anbuky, A. (2015) 'Modelling the Integrated QoS for Wireless Sensor Networks with Heterogeneous Data Traffic', Open Journal of Internet Of

Things (OJIOT) 2015, 1(1).

- [116]. Bildea Ana. (2013) 'Link Quality in Wireless Sensor Networks'. Other [cs.OH]. University of Grenoble, English. <NNT: 2013GRENM054>. <tel-01167272>.
- [117]. Djenouri, D. and Balasingham, I. (2011) 'Traffic-differentiation-based modular QoS Localized routing for wireless sensor networks', IEEE Transactions on Mobile in Computing, Vol. 10, No. 6, pp. 797–809.
- [118]. BEN NACEF, A. (2011) 'Relais coopératifs dans un réseau de capteurs : performances limites et stratégies', thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- [119]. Sun, W. and Wang, J. (2014) 'Cross-Layer QoS Optimization of Wireless Sensor Network for Smart Grid', International Journal of distributed sensor networks, Vol. 2014(2014).