

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique



Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master recherche en Informatique

Spécialité: Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Routage avec Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc

Réalisé par :

M^r SEBAHI Yazid & M^{lle} YESSAD Nawel

Devant le jury composé de:

Président :	M ^r	KHANOUCHE	M.Essaid	M.A.A.
Examineur :	D ^r	BADAACHE	A.Rahmene	M.C.B.
Examineur :	D ^r	OMAR	Mawloud	M.C.B.
Encadreur :	M ^{me}	BOULAHROUZ	Djamila	M.A.A.

Promotion 2013

** * * * Remerciements * * * **

*N*ous rendons grâce à notre Dieu, le tout puissant et miséricordieux, pour nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bout ce modeste travail et qui nous a procuré ce succès.

*N*os plus sincères remerciements s'adressent à notre Promotrice M^{me} BOULAHREUZ Djamila, pour nous avoir proposé cet intéressant sujet et pour ses précieux conseils et encouragements, sans lesquels cette étude n'aurait pas vu le jour. Merci pour votre confiance, votre disponibilité et vos encouragements.

*N*ous remercions tous particulièrement les membres de jury, en l'occurrence M^r KHANOUCHE M.Essaid, D^r BADAACHE A .Rahmene et D^r OMAR Mawloud d'avoir accepté d'évaluer notre travail et pour l'intérêt qu'ils y portent. Ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

*U*n grand merci à nos familles, pour leur soutien permanent et indéfectible qui nous ont permis de chercher au plus profond de nous même la force, la volonté et la persévérance à même d'arriver à cet instant des plus important de notre vie.

*U*n merci pudique à nos amis, nos collègues en Master 2 et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de cette œuvre.

** * * * Dédicaces * * * **

Je dédie ce modeste travail:

À la mémoire de mon père et, mon grand-père.

A ma chère mère pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde.

À mes sœurs Souhila et Nassima ainsi qu'à leurs maries.

À mes deux adorables neveux Mehdi et Racim.

À mes très chères petites sœurs Narimane et Sabrina.

À mes grands-mères.

À mes oncles, tantes ,cousins et cousines.

À mes amis(es) ceux avec j 'ai parcouru le long chemin avec tant de peine et de
joie.

À mon binôme SEBAHI Yazid et sa famille.

Mlle YESSAD Nawel

À mes parents

À mes frères et sœurs Souad, Nadir, Samir, Omar et Souhila

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me
permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

À mes neveux et nièces.

Meilleurs vœux de succès dans vos études.

À tous mes amis et amies et plus particulièrement mon binôme YESSAD Nawel.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Et à tous les étudiants de la promotion Informatique.

Je dédie ce travail.

Mr SEBAHI Yazid

Table des Matières

Table des Matières	i
Liste des Acronymes	v
Liste des Figures	vii
Liste des Tableaux	x
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les réseaux sans fil	4
1.1 Introduction	4
1.2 Les réseaux sans fil	5
1.2.1 Définition	5
1.2.2 Technique de communication sans fil	5
1.2.3 Catégories des réseaux sans fil	6
1.3 Présentation de la norme IEEE 802.11	8
1.3.1 Modèle de références du standard IEEE 802.11	8
1.3.2 Le standard 802.11	8
1.3.3 Les différentes extensions de la norme 802.11	13
1.4 Les réseaux mobiles	14
1.4.1 Définition de la mobilité	14
1.4.2 Définition d'un réseau mobile	14
1.4.3 Classification des réseaux mobiles selon l'infrastructure	15
1.5 les réseaux mobiles Ad hoc (MANET)	16
1.5.1 Définition	16
1.5.2 Historique et évolution des réseaux ad hoc	17
1.5.3 Modélisation d'un réseau Ad hoc	17
1.5.4 Modes de communication	18

1.5.5	Propriétés et spécificités des réseaux mobiles ad hoc	19
1.5.6	Domaines d'applications des réseaux Ad Hoc	21
1.6	Conclusion	22
2	 Routage dans les réseaux mobiles ad hoc	23
2.1	Introduction	23
2.2	Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc	24
2.2.1	Définition	24
2.2.2	Problématique du routage dans les réseaux ad hoc	24
2.2.3	Les contraintes de routage dans les réseaux ad hoc	25
2.3	Classification des protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad hoc	26
2.3.1	Classification selon l'architecture	26
2.3.2	Classification selon l'approche de routage	28
2.3.3	Classification selon l'algorithme utilisé	29
2.4	Description de quelques protocoles MANETs	31
2.4.1	Le protocole de routage DSDV	31
2.4.2	Le protocole de routage DSR	32
2.4.3	Le protocole de routage AODV	32
2.4.4	Le protocole de routage ZRP	33
2.4.5	Le protocole de routage CBRP	34
2.4.6	Le protocole de routage ZHLS	34
2.4.7	Le protocole de routage LAR	35
2.4.8	Le protocole de routage DREAM	35
2.4.9	Le protocole de routage GPSR	36
2.5	Etude détaillée du protocole OLSR	36
2.5.1	Détection de voisinage	36
2.5.2	La technique de relais multipoints	39
2.5.3	Gestion de la topologie	40
2.5.4	Calcul des routes	41
2.6	Synthèse	42
2.7	Conclusion	45
3	 Qualité de Service dans les réseaux mobiles ad hoc	46
3.1	Introduction	46
3.2	Définition de la qualité de service	47
3.3	Les Métriques de la qualité de service	47
3.3.1	La bande passante	48

3.3.2	Délai de bout en bout	48
3.3.3	La gigue (variation du délai)	48
3.3.4	La perte des paquets	49
3.4	Qualité de service dans les réseaux ad hoc	49
3.4.1	Le besoin en QoS des applications	49
3.4.2	Objectifs de la qualité de service	50
3.5	Solutions de qualité de service dans les réseaux ad hoc	50
3.5.1	Modèle de qualité de service	51
3.5.2	La couche MAC avec qualité de service	56
3.5.3	Protocoles de signalisation	57
3.5.4	Routage avec qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc	60
3.6	Conclusion	64
4	QS-OLSR: Une version d'OLSR avec Qualité de Service	65
4.1	Introduction	65
4.2	Raisons de choix du protocole OLSR	66
4.3	OLSR: QoS implicite	66
4.4	Le protocole QOLSR	67
4.4.1	Principe de fonctionnement de QOLSR	68
4.4.2	Synthèse des solutions existantes	69
4.5	Présentation de la solution proposée : QS-OLSR	71
4.5.1	Motivation	71
4.5.2	Hypothèses	71
4.5.3	Notations	72
4.5.4	Description de notre solution	72
4.5.5	les paramètres de la QoS utilisés	73
4.5.6	Type et structure des paquets	75
4.5.7	Notre algorithme de sélection des relais multipoints	79
4.6	Conclusion	84
5	Simulations et Résultats	85
5.1	Introduction	85
5.2	Les simulateurs existants	86
5.2.1	Raisons du choix de OPNET Modeler	86
5.3	Présentation de OPNET Modeler	87
5.3.1	Concepts de bases du simulateur OPNET	87
5.4	Etapes d'implémentation de QS-OLSR	91
5.4.1	Modèle d'architecture de OLSR	92

5.4.2	Modèle d'OLSR dans OPNET	93
5.4.3	Implémentation de QS-OLSR dans OPNET	95
5.5	Objectifs de la simulation	100
5.5.1	Métriques de la simulation	101
5.6	Modèle de simulation utilisé	102
5.6.1	Scénarios de simulation	103
5.7	Simulation: Résultats & interprétations	104
5.7.1	Performances best-effort	104
5.7.2	Performances QoS (application vidéoconférence)	109
5.8	Conclusion	111
	Conclusion Générale	113
	Bibliographie	115

LISTE DES ACRONYMES

ABR	Associativity-Based Routing
AODV	Ad hoc On demand Distance Vector routing.
BE	Best Effort
BRuiT	Bandwidth Reservation under InTerferences influence
BSS	Basic Service Set
CBRP	Cluster Based Routing Protocol.
CCITT	Consultative Committee for International Telegraph and Telephon
CDMA	Code Division Multiple Access
CEDAR	Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing Algorithm
CGSR	Cluster Gateway Switch Routing protocol
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency.
DCF	Distributed Coordination Function
DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing.
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FHSS	Frequency Hoping Spread Spectrum.
FSR	Fisheye State Routing.
FQMM	Flexible Quality of service Model for MANETs.
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Network.
GSM	Global System for Mobile Communication.
GSR	Global State Routing
HiperLAN2	HIgh Performance Radio LAN 2.0.
IARP	IntrAzone Routing Protocol.
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IETF	International Engineering Task Force.
IERP	IntErzone Routing Protocol
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.
IMAQ	Integrated Mobile Ad hoc Qos framework
IP	Internet Protocol.
IR	Infra Red
LAR	Location-Aided Routing
LLC	Logical Link Control
LMR	Label-based Multipath Routing
MAC	Medium Access Control
MACA/PR	Multiple Access Collision Avoidance with Piggyback Reservation
MANET	Mobile Ad hoc NETwork.
Mbps	Méga bits par seconde.
MPR	MuliPoint Relay
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex.
OLSR	Optimized Link State Routing protocol
OSI	Open System Interconnexion
PCF	Point Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
QoS	Quality of Service
RFC	Request For Comments
RREP	Route REPLY
RREQ	Route REQuest.
SSA	Signal Stability-Based Adaptive Routing
SWAN	Service Differentiation in Wireless Ad Hoc Networks
TBR	Ticket-Based QoS Routing
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WRP	Wireless Routing Protocol
WWAN	Wireless Wide Area Networks
ZHLS	Zone-Based Hierarchical Link State Routing Protocol
ZRP	Zone Routing Protocol.

LISTE DES FIGURES

1.1	Classification des réseaux sans fil.	7
1.2	802.11 et le modèle OSI.	8
1.3	Les sous-couches de la couche physique 802.11.	9
1.4	La couche physique dans le réseau sans fil.	9
1.5	Étalement de Spectre à Séquence Directe (DSSS).	10
1.6	Multiplexage par Répartition Orthogonale de la Fréquence.	11
1.7	Exemple de mode infrastructure.	15
1.8	Exemple de mode ad Hoc.	16
1.9	Modélisation d'un réseau ad hoc.	18
1.10	Mobilité dans les réseaux ad hoc.	18
1.11	Modes de communication dans les réseaux mobiles.	19
2.1	Routage plat.	27
2.2	Routage hiérarchique.	27
2.3	Zone de routage du nœud A définie par ZRP.	33
2.4	Les différents types de nœuds dans le protocole CBRP.	34
2.5	Détection de voisinage par l'échange de message HELLO.	37
2.6	Format du message Hello.	38
2.7	Format du champ Link Code.	39
2.8	Principes de l'inondation classique et par MPR.	40
2.9	Format d'un message TC	41
2.10	Format de la table de routage du protocole OLSR	42
2.11	Les protocoles de routage ad hoc.	43
3.1	Besoin en délai et bande passante des applications.	50
3.2	Solutions de QoS pour les réseaux ad hoc.	51
3.3	Le modèle FQMM.	54
3.4	Le modèle SWAN.	55
3.5	Le modèle IMAQ.	55

3.6	Architecture INSIGNA.	59
4.1	Topologie entiere et topologie partielle.	68
4.2	Exemple de représentation d'un MANET avec les deux métriques de QoS.	73
4.3	Format du message Hello dans QS-OLSR.	76
4.4	Format de l'extension apportée à la table des voisins.	77
4.5	Format de l'extension apportée à la table des voisins à deux sauts.	77
4.6	Format de l'extension apportée à la table des MPR	77
4.7	Format d'un message TC avec le protocole QS-OLSR.	78
4.8	Format de la table topologique.	78
4.9	Format de la table de rouatge	79
4.10	Organigramme de sélection des relais multipoints.	81
4.11	Exemple de sélection des relais multipoints.	82
5.1	Editeur de projet.	88
5.2	Editeur de réseaux.	89
5.3	Editeur d'équipement.	89
5.4	Editeur de processus.	90
5.5	Etapas de modélisation et simulation d'un projet.	91
5.6	Modèle d'une station équipée d'une carte sans fil.	92
5.7	Modèle d'architecture de OLSR.	93
5.8	Modèle olsr-rte.	94
5.9	Structure des tables dans le modèle OLSR.	94
5.10	Structure de données modifiée et associée aux messages Hello.. . . .	95
5.11	Fonction de sélection des MPRs.	98
5.12	Structure de données associée aux liens.	99
5.13	Structure de données de l'algorithme Dijkstra.	99
5.14	Sélection des valeurs statistiques.	101
5.15	Exemple de disposition des nœuds.	102
5.16	Paramètres de simulation du protocole OLSR.	103
5.17	Caractéristique de l'application best-effort.	103
5.18	Caractéristique de la vidéo conférence.	104
5.19	Nombre de MPR sélectionné par (a) et (b).	105
5.20	Trafic de contrôle envoyé par (a) et (b).	106
5.21	Délai globale de découverte de routes généré par (a) et (b)	106
5.22	Débit globale offert par (a) et (b)	107
5.23	Trafic FTP envoyé par (a) et (b).	108

5.24	Trafic FTP reçu par (a) et (b).	108
5.25	Délai globale de découverte de routes généré par (a) et (b)	109
5.26	Débit globale offert par (a) et (b).	110
5.27	Délai de bout en bout pour la vidéoconférence généré par (a) et (b). .	110
5.28	Variation du délai vidéo conférence (gigue).	111

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Classification des réseaux sans fil	7
2.1	Avantages et inconvénient des différentes catégories de protocoles de routage	44
4.1	Les MPRs sélectionnés par le noeud A dans le protocole OLSR natif .	83
4.2	Les MPRs sélectionnés par le noeud A dans le protocole QS-OLSR .	84
5.1	Listes des simulateurs réseaux et leurs fonctions.	86
5.2	Modèles processus du protocole OLSR.	93
5.3	Les paramètres de l’environnement définis pour les simulations	102

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. En effet et en comparaison avec l'environnement filaire qui a montré ses limites, l'environnement sans fil permet aux utilisateurs une souplesse d'accès et une facilité de manipulation des informations via divers unités de calcul mobiles [59]. La recherche dans ce domaine est en pleine effervescence depuis le début des millénaires, ce qui est amplement justifié et motivé du fait de la flexibilité de leur interface qui permet l'accès à l'information tout en étant mobile.

Les réseaux mobiles sans fil sont classés en deux catégories: les réseaux avec infrastructure fixe et préexistante qui utilisent généralement le modèle de la communication cellulaire (Les réseaux GSM, GPRS, UMTS), et les réseaux sans infrastructure appelés communément MANET (Mobile Ad hoc Network). Un réseau mobile ad hoc consiste donc en un grand nombre d'unités mobiles se déplaçant dans un environnement quelconque en utilisant, comme moyen de communication, des interfaces sans fils. Ces réseaux sont composés de nœuds potentiellement mobiles et reliés généralement par liaisons radio. Si un nœud émetteur est hors de la portée de communication d'un nœud destinataire alors les informations devront être transmises de proche en proche, le long d'un chemin établi et maintenu par le réseau.

Vu les caractéristiques et les limitations qu'engendre un MANET, la tâche la plus difficile qu'il peut affronter est le routage. Plusieurs travaux sur ce thème ont été réalisés [102] mais la majorité se focalise sur le trafic best-effort des données qui ne permet pas de garantir une qualité de service(QoS). Récemment et à cause de la popularité croissante des applications multimédia dans les réseaux ad hoc, des garanties de la qualité de service sont de plus en plus exigées pour déployer ce type d'applications. De ce fait, la qualité de service dans les MANETs est devenue un thème de recherche qui suscite beaucoup d'intérêt.

Motivations et problématique: l'évolution et l'expansion des MANETs dans le monde ont ouvert la voie à l'émergence de plusieurs axes de recherche dans le domaine portant sur l'étude de la qualité de service dans ces réseaux, sans toutefois aucune des solutions proposées ne puisse faire l'objet d'une normalisation. Ces recherches peuvent être classées en quatre grandes catégories [66]: les modèles de qualité de service, les protocoles d'accès au médium, les protocoles de signalisation et le routage avec qualité de service.

C'est dans la perspective de la dernière catégorie que s'inscrivent les travaux effectués dans ce mémoire. De nombreuses approches ont été examinées et de nombreux protocoles avec qualité de service ont été proposés [79]. Cependant, il est très difficile de garantir une quelconque qualité de service à une application temps réel dans un réseau ad hoc, car il faut prendre en considération les spécificités de ces réseaux, notamment la bande passante limitée et le changement dynamique de la topologie.

Contributions: Notre objectif est de proposer une extension du protocole OLSR de base en le rendant sensible à deux métriques de QoS à savoir, la bande passante et le délai. Cette extension aspire à une meilleure performance d'OLSR en terme de QoS et ce en déterminant le chemin avec une bande passante maximale et un délai minimum. Nos contributions peuvent être énumérées comme suit:

1. Une étude synthétique des travaux de recherche qui ont été faits dans le domaine des MANETs notamment des protocoles de routages avec qualité de service.
2. Conception et mise au point de notre proposition qui consiste à étendre la version standard d'OLSR avec QoS. Cette extension va permettre de sélectionner le meilleur ensemble de relais multipoints qui satisfont les exigences de bande passante maximale (aussi bien au niveau du lien premier saut qu'au niveau du lien deuxième saut) et de délai minimal.
3. Implémentation de notre proposition en utilisant OPNET Modeler qui intègre la version basique d'OLSR.
4. Exécution de plusieurs simulations via OPNET afin d'évaluer et comparer les performances d'OLSR étendu (baptisé QS-OLSR) par rapport à la version originale d'OLSR.
5. Prouver que QS-OLSR proposé offre une meilleure qualité de service en se basant sur deux exemples d'application : vidéoconférence et FTP.

Organisation du mémoire :

-Le premier chapitre présente les étapes d'évolution des réseaux sans fil et des différents concepts liés à ce type de réseaux ainsi qu'une description de la norme de la norme IEEE 802.11. Enfin, il précise les notions de base des réseaux mobiles ad hoc (MANETs), les principales caractéristiques et les contraintes qui en découlent.

-le deuxième chapitre décrit les principes du routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Il s'intéresse plus précisément à la problématique du routage et les contraintes liées aux MANETs. Il décrit également les principaux protocoles proposés et leurs classifications. Enfin il présente une étude détaillée du protocole OLSR.

-le troisième chapitre introduit le concept de qualité de service ainsi qu'un état de l'art sur les solutions existantes, plus particulièrement le routage avec QoS dans les MANETs. Une présentation des métriques liées particulièrement à la qualité de service est exposée.

-le quatrième chapitre présente notre contribution pour l'amélioration de la qualité de service du protocole OLSR. Il consiste en une présentation de l'algorithme proposé de la sélection des relais multipoints en se basant sur les valeurs optimales de la bande passante et du délai. Il décrit également les méthodes d'estimations des métriques considérées.

-Le cinquième chapitre sera consacré à l'implémentation de QS-OLSR ainsi qu'aux simulations et à la discussion des résultats obtenus. Les surcoûts engendrés par la solution proposée en comparaison avec les résultats de la version classique du protocole OLSR soumis aux mêmes scénarios et paramètres seront aussi présentés.

Une conclusion générale reprenant les points forts de ce travail, ponctuée de perspectives futures éventuelles, termine ce mémoire.

1

Généralités sur les réseaux sans fil

1.1 Introduction

Les réseaux sans fil constituent de plus en plus une technologie émergente permettant à ses utilisateurs un accès à l'information et aux services électroniques indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ad hoc appelés généralement MANET constituent un nouveau type de réseaux basés sur cette technologie.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux concepts de base liés à la technologie de communication sans fil utilisée dans les réseaux mobiles. Pour cela, nous détaillons quelques principales notions nécessaires à la compréhension de ces systèmes, ainsi que les classifications principales des réseaux sans fil et les différentes technologies utilisées dans chaque catégorie. Nous allons exposer une présentation globale de la norme 802.11 et nous introduisons le concept des réseaux mobiles ad hoc et certaines de leurs caractéristiques et leurs domaines d'application.

1.2 Les réseaux sans fil

1.2.1 Définition

Un réseau sans fil (en anglais *wireless network*) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Il peut être considéré comme un système de transmission de données, dont le but est d'assurer une liaison indépendante de l'emplacement des entités informatiques qui composent le réseau. Les réseaux sans fil définissent une communication par ondes radioélectriques (radios et infrarouges). Grâce à ces derniers, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans une zone géographique plus ou moins étendue [2].

1.2.2 Technique de communication sans fil

Dans tout système de transmission de données, le support de transmission est défini comme le chemin physique entre l'émetteur et le récepteur. Ce support, aussi appelé média ou medium peut être guidé (câbles en cuivre, fibre optique, ...) ou non guidé (deux média peuvent être utilisés : les liaisons infrarouges ou les ondes radios) [2].

1.2.2.1 Liaisons infrarouges

Les liaisons infrarouges sont utilisées dans les communications courtes et en vue, elles sont simples et peu coûteuses. Elles conviennent aux réseaux à faible portée. Les émetteurs et récepteurs à infrarouge sont capables de fournir des débits élevés à des coûts relativement faibles. Les bandes passantes disponibles sont très larges, les liaisons infrarouges pénètrent à travers le verre, mais pas à travers les murs ou tout autre obstacle opaque, ceci implique que les communications se font dans la même pièce, ce qui augmente la sécurité.

1.2.2.2 Liaisons radios

Le principe est d'émettre des ondes électromagnétiques qui constituent la porteuse du signal à transmettre. Ces ondes sont donc propagées dans toutes les liaisons et peuvent être captées par plusieurs antennes. Le medium radio est découpé en bandes de fréquences divisées en canaux. Il est caractérisé par sa moindre fiabilité par rapport au medium filaire.

1.2.3 Catégories des réseaux sans fil

Nous trouvons généralement quatre catégories de réseaux sans fil suivant la zone de couverture et la distance entre les nœuds.

1.2.3.1 Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Le réseau personnel sans fil noté (WPAN pour *Wireless Personal Area Network*) concerne les réseaux sans fil d'une faible portée (de l'ordre de quelques dizaines de mètres). Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Pour mettre en œuvre de tels réseaux, la principale technologie est IEEE 802.15 ou Bluetooth. Les technologies infrarouges, HomeRF et ZigBee sont également utilisées dans ce type de réseaux [3].

1.2.3.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN)

Le réseau local sans fil (WLAN pour *Wireless Local Area Network*) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise ou d'un campus, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre-deux terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe plusieurs technologies concurrentes à savoir le WiFi ou IEEE 802.11 et hiperLAN2 [2].

1.2.3.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Le réseau métropolitain sans fil (WMAN pour *Wireless Metropolitan Area Network*) également appelé boucle locale radio (*BLR*) était, à l'origine, prévu pour interconnecter des zones géographiques difficiles d'accès à l'aide d'un réseau sans fil [4]. Les WMAN sont fondés sur la norme IEEE 802.16. WiMAX étant certainement le plus prometteur dans ce domaine, permet d'obtenir des débits de l'ordre 70 Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres [2].

1.2.3.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN)

Le réseau étendu sans fils (WWAN pour *Wireless Wide Area Network*) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Sont des réseaux sans fils les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes : GSM, GPRS, UMTS [2] [5].

La Figure 1.1 représente la classification des réseaux sans fil

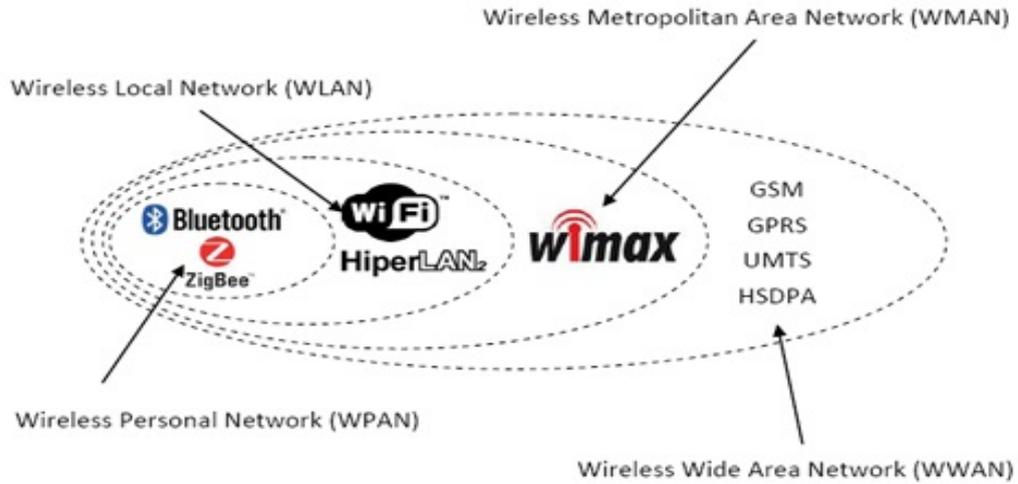


Figure 1.1: Classification des réseaux sans fil.

Le tableau 1.1 résume les différentes technologies utilisées dans chaque catégorie et leurs caractéristiques.

Catégorie	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Standard	IEEE 802.15	802.11	802.16	802.20
Technologie	Bluetooth HomeRF Zigbee IR (infrarouge)	Wifi HyperLan1 HyperLan2	Wimax	GSM GPRS UMTS
Couverture	Quelques dizaines de mètres	Une centaine de mètres	Quelques dizaines de Kilomètres	Une centaine de kilomètres
Débit	< 1Mbps	2 à 54 Mbps	Jusqu'à 70 Mbps	10 à 385 Kbps
Applications	Point à point Equipement à équipement	Réseau d'entreprise	Fixe , accès au dernier kilomètre	GSM PDA

Table 1.1: Classification des réseaux sans fil

1.3 Présentation de la norme IEEE 802.11

1.3.1 Modèle de références du standard IEEE 802.11

Le modèle OSI (*Open System Interconnexion*) est conçu initialement pour répondre aux besoins des réseaux filaires, or les réseaux sans fil ont des caractéristiques différentes des réseaux filaires telles que la mobilité, la qualité du signal, ...). Mais malgré ces particularités, le passage au monde sans fil a gardé le principe de conception en couche du modèle OSI.

1.3.2 Le standard 802.11

La norme originelle 802.11 de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), datant de 1997 est le standard le plus répandu dans le monde des réseaux sans fil. Cette norme est prévue pour fonctionner dans deux contextes: infrastructure et ad hoc. Le standard 802.11 s'attache à définir les couches basses du modèle OSI pour une liaison sans fil utilisant des ondes électromagnétiques à savoir : La couche physique et La couche liaison de données (voir la Figure 1.2).

La couche physique diffère suivant le standard IEEE 802.11 utilisé. Elle définit la modulation des ondes radioélectriques et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données [9] [10], tandis que la couche liaison de données définit l'interface entre le bus de la machine et la couche physique, notamment une méthode d'accès proche de celle utilisée dans le standard Ethernet et les règles de communication entre les différentes stations [12] [13].

Une des caractéristiques essentielles de ce standard est qu'il définit une couche MAC commune à toutes les couches physiques. Donc, de futures couches peuvent être ajoutées sans avoir besoin de modifier la couche MAC.

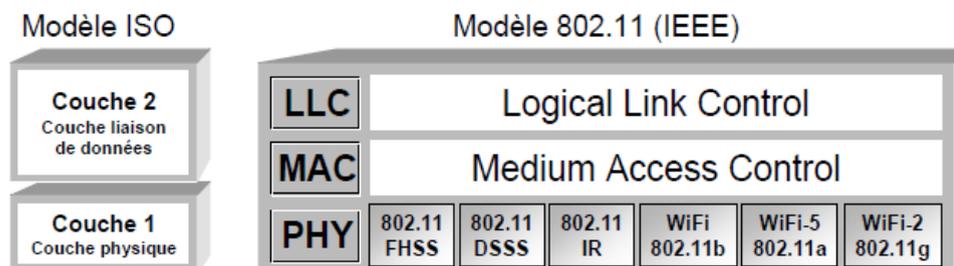


Figure 1.2: 802.11 et le modèle OSI.

1.3.2.1 La couche physique

La couche physique [10] définit les aspects électriques, mécaniques et fonctionnels de l'accès au canal de communication, ainsi que les protocoles d'échange de données via le réseau. Elle assure entre autres, les relations entre les couches supérieures et le matériel. Cette couche est divisée en deux sous-couches (voir Figure 1.3):

- La sous-couche PLCP (*Physical Layer Convergence Protocol*): Cette sous-couche est chargée de l'écoute du support et de la signalisation vers la couche MAC ;
- La sous-couche PMD (*Physical Medium Dependent*): Cette sous-couche se focalise sur l'encodage des données et la modulation.

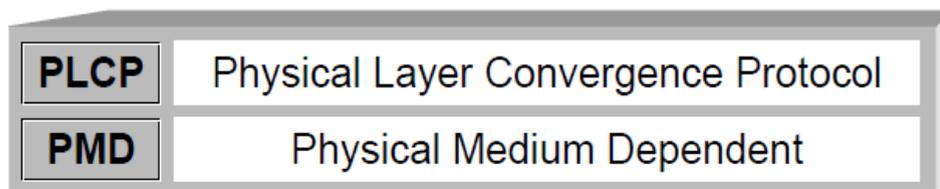


Figure 1.3: Les sous-couches de la couche physique 802.11.

Nous ne présentons dans cette section que les aspects de la sous-couche PMD et plus précisément les aspects de modulation. Les modulations employées par la couche physique des différentes normes IEEE 802.11 sont représentées sur la Figure 1.4. La norme physique initiale 802.11 propose deux types de transmission à modulation de fréquence (FHSS et DSSS) associés à une modulation de phase et une technique de transmission à infrarouge (IR). Avec l'apparition des standards (IEEE 802.11a et IEEE 802.11g), une autre modulation de fréquence (OFDM) a été adoptée accroissant les débits offerts.

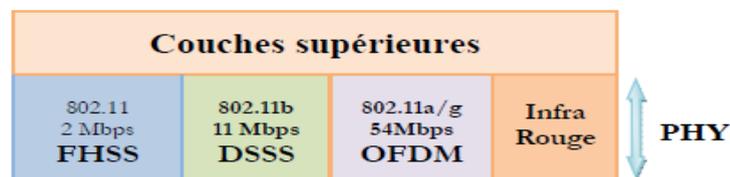


Figure 1.4: La couche physique dans le réseau sans fil.

- **FHSS** (étalement de Spectre avec Saut de Fréquences)

FHSS (*F*requency *H*opping *S*pread *S*pectrum) est utilisée dans les réseaux 802.11b et d'autres technologies sans fil, cette technologie utilise la technique de transmission par étalement de spectre par saut de fréquence. Son principe est de diviser la bande passante en 79 sous-canaux, dont chacun offre une largeur de bande de 1 MHz, elle offre un débit relativement faible allant de 1 à 2 Mbit/s [14] [15].

- **DSSS** (étalement de Spectre à Séquence Directe)

DSSS (*D*irect *S*equen*S* *S*pread *S*pectrum) est une technologie de transmission par spectre étalé, où la porteuse est successivement modulée par l'information et par un code pseudo aléatoire de débit beaucoup plus important. Le signal résultant occupe donc une bande très importante. Dans cette technique, la bande de fréquence ISM des 2.4 GHz est divisée (comme la montre la Figure 1.5) en 14 sous-canaux de largeur 22 MHz se recouvrant partiellement et peuvent donc se perturber mutuellement (seuls trois sous-canaux sur les 14 étant entièrement isolés). Cette technique offre des débits de transmission allant de 5.5 à 11 Mbit/s [16] [17].

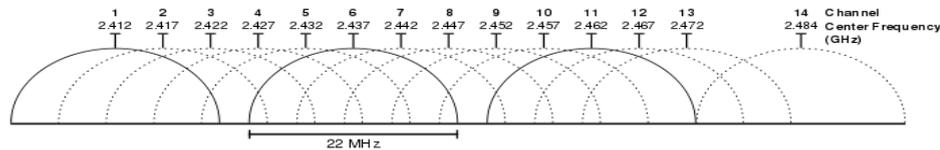


Figure 1.5: Étalement de Spectre à Séquence Directe (DSSS).

- **Infrarouge**

Le mode de communication par infrarouge est simple, peu réglementé et peu coûteux. En utilisant un faisceau de lumière, ce mode est basé sur l'utilisation des mêmes fréquences que celles utilisées par les fibres optiques [10]. Cette technologie a pour caractéristique principale d'utiliser des ondes lumineuses pour la transmission de données. Ainsi les transmissions se font unidirectionnelles, soit en vue directe soit par réflexion.

- **OFDM** (Multiplexage par Répartition Orthogonale de la Fréquence)

La modulation OFDM (*O*rt*H*ogonal *F*requency *D*ivisi*S*on *M*ultiplexing), parfois appelée *D*iscrete *M*ultit*S*one *M*odulation (DMT) [17] représente une technique de modulation numérique des signaux, utilisée entre autres pour les systèmes de transmissions mobiles à haut débit de données. Elle consiste à répartir le signal sur un grand

nombre de sous porteuses orthogonales modulées individuellement à bas débit. Elle offre un débit allant jusqu'au 54 Mbit/s en utilisant une modulation de phase. Elle subdivise la bande U-NII (*Unified National Information Infrastructure*) des 5 GHz en 12 canaux disjoint de 20 MHz (voir Figure 1.6) [4].

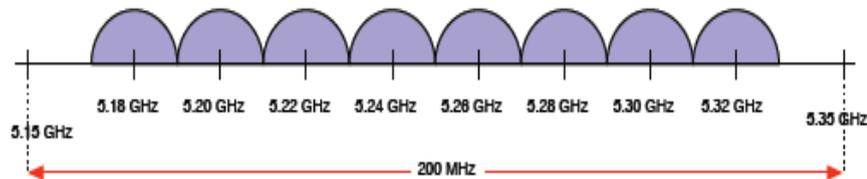


Figure 1.6: Multiplexage par Répartition Orthogonale de la Fréquence.

1.3.2.2 La couche liaison de données

La couche a pour objectif de réaliser l'acheminement sans erreurs de blocs d'informations sur la liaison physique. Afin d'effectuer une transmission correcte, la couche de liaison de données attache des en-têtes et des caractères aux paquets de données à transmettre. Dans ce cas, les messages échangés sont appelés trames MAC ou *MPDU* (*MAC Protocol Data Unit*). Ceux-ci seront encapsulés par la suite dans des trames de niveau physique appelées *PLCP-PDU* (*Physical Level Control Protocol-PDU*). La couche de liaison de données comprend essentiellement deux sous-couches :

- La sous-couche LLC (*Logical Link Control*)

La sous-couche LLC (spécification IEEE 802.2), qui est indépendante des mécanismes d'accès au support physique, représente une partie de la couche de liaison de données. Elle présente les caractéristiques de fiabilité grâce au séquençement et la retransmission des données en cas de détection d'erreurs.

- La sous-couche MAC (*Medium Access Control*)

La sous-couche MAC caractérise l'accès au médium de façon commune aux différentes normes IEEE 802.11. Elle met en œuvre les fonctionnalités nécessaires pour la réalisation d'une transmission correcte point à point à savoir la détection d'erreur, la retransmission en cas de perte ou de trame erronée, l'envoi d'accusé de réception et la fragmentation des données [10]. La norme IEEE 802.11 définit deux modes d'accès au médium au niveau MAC [12] le mode centralisé " *Point Coordination Function (PCF)* " et le mode distribué " *Distributed Coordination Function (DCF)* " [16].

- **PCF**: est utilisé dans le cas où un équipement tiers (point d'accès ou station de base) est disponible et doit faire office de maître distribuant à tour de rôle l'accès au canal aux stations connectées. Une station ne peut émettre que si elle est autorisée et ne peut recevoir que si elle est sélectionnée [10] [16]. Le mode PCF est particulièrement bien adapté au mode infrastructure de la norme IEEE 802.11 [11].

- **DCF**: ce mode peut être utilisé par tous les mobiles, et qui permet un accès équitable au canal radio sans aucune centralisation de la gestion de l'accès. Les nœuds mobiles communiquent directement entre eux sans avoir recours à une tierce station. Ce mode peut aussi bien être utilisé lorsqu'il n'y a pas de stations de base (mode ad hoc) que lorsqu'il y en a (mode infrastructure). il a été conçu pour prendre en charge le transport de données asynchrones [11] [13].

Des protocoles ont été proposés afin de résoudre ces problèmes d'accès. Dans ce qui suit nous présentons un échantillon de ces techniques dans le cadre des réseaux sans fil.

- **FDMA** (*Frequency Division Multiple Access*)[19]

L'idée est de diviser le spectre en canaux et chaque canal fréquentiel est affecté à un seul utilisateur à la fois. La méthode d'affectation d'un canal est alors basée sur une règle de type premier arrivé, premier servi ou FIFO (*First In First Out*).

- **TDMA** (*Time Division Multiple Access*)

Dans cette technique, les canaux sont multiplexés sous la forme d'intervalles de temps de telle manière que chaque utilisateur accède à toute la bande passante allouée pour le système de transmission durant un intervalle [19]. L'inconvénient d'une telle approche est qu'elle nécessite une synchronisation très fine [20].

- **CDMA** (*Code Division Multiple Access*)

En CDMA, tous les utilisateurs accèdent simultanément à la totalité de la bande, ils sont distingués à la réception grâce à des codes pseudo-aléatoires personnels. Ce qui permet d'avoir une bonne immunité au bruit et la possibilité d'utiliser la diversité de fréquences. La technique CDMA utilise des modulations à étalement de spectre qui peuvent être réalisées par saut de fréquence ou par séquence directe. En effet, le CDMA est très souple au niveau des débits transmis, mais relativement complexe car elle peut nécessiter une égalisation à la réception et un contrôle de la puissance d'émission [15].

- **CSMA/CA** (*Canal Sense Multiple Access/Collision Avoidance*)

C'est une technique permettant d'éviter les collisions entre les utilisateurs d'un réseau, en s'assurant que chacun parle à son tour et pas tous en même temps [15].

1.3.3 Les différentes extensions de la norme 802.11

Dans le but de pallier certaines lacunes des réseaux sans fil, plusieurs nouvelles extensions ont été proposées. Nous présentons les principales dérivées de la norme 802.11 et leurs caractéristiques :

802.11a : Appelé également WiFi5, cette norme spécifie 8 canaux radio dans la bande de fréquences des 5 GHz. Elle permet d'atteindre un débit théorique de 54 Mbits/s (30 Mbits/s réel) sur une portée d'une cinquantaine de mètres [21] par utilisation du principe de l'OFDM (déjà évoqué dans la section 1.3.2.1) [2].

802.11b : Le terme WiFi (*Wireless Fidelity*) fait référence à cette norme qui fut la première norme des WLAN utilisée par un grand nombre d'utilisateurs. La norme 802.11b est maintenant supplanté par la 802.11g, elle offre un débit théorique de 11Mbit/s (6 Mbit/s réel) dans la bande des 2.4 GHz, avec une portée de 300m. La norme 802.11b est définie par une modulation DSSS (présentée dans la section 1.3.2.1) [22] .

802.11c : Propose une modification de la norme 802.11d existante pour les réseaux filaires afin de la transposer à 802.11. Elle permet une normalisation de l'interconnexion de niveau 2 (pont) entre un réseau filaire et un réseau Wifi [23] [24].

802.11d : S'occupe de l'actualisation des réglementations différentes dans chaque pays [23].

802.11e : qui vise à donner des possibilités en matière de qualité de service au niveau de la couche liaison de données pour les applications multimédia et temps réel [22].

802.11f : Cette norme gère l'interopérabilité entre des points d'accès de différents fabricants [22].

802.11g : Elle étend la norme 802.11b, en augmentant le débit jusqu'à 54Mbit/s. Elle fonctionne aussi à 2,4 GHz, ce qui rend les deux normes parfaitement compatibles. Grâce à cela, les équipements 802.11b sont utilisables avec les points d'accès 802.11g et vice-versa. Cependant, 802.11g utilise la technique de modulation OFDM [22].

802.11h : Traite de la gestion du spectre et de la puissance afin de les rendre conformes aux normes européennes [2].

802.11i : Gère le mécanisme d'authentification et de sécurité au niveau de la couche MAC. Cette norme s'appuie sur l'AES (*A*dvanced *E*ncryption *S*tandard) et propose un chiffrement des communications pour les transmission utilisant les standards 802.11a, 802.11b et 802.11g [2].

802.11n : Propose un débit théorique de 540 Mbits/s (débit réel de l'ordre de 100 Mbit/s) sur une portée de 150 mètres [22]. Grâce à l'utilisation conjointe des techniques MIMO (**M**ultiple-**I**nput **M**ultiple-**O**utput) et OFDM. Elle propose l'utilisation des deux bandes de fréquences 2,4 GHz (comme 802.11b et 802.11g) et 5 GHz (comme 802.11a) [24]. Cette norme reste compatible avec 802.11; de plus, elle reprend les concepts de 802.11e pour la gestion de la qualité de service et de 802.11i pour la sécurité.

1.4 Les réseaux mobiles

1.4.1 Définition de la mobilité

Le terme mobilité est la capacité ou la facilité d'un objet ou d'une personne à se déplacer par rapport à un lieu, à une position ou à un ensemble d'objets de même nature. Dans le domaine des réseaux, la mobilité se traduit par la possibilité que certaines entités peuvent passer d'une cellule à une autre sans perdre la liaison [59].

1.4.2 Définition d'un réseau mobile

Un réseau mobile est un système composé de nœuds reliés les uns aux autres par des liaisons de communication sans fil. Ces nœuds sont libres de se déplacer sans perte de leurs connexions au réseau. Un réseau mobile peut contenir des sites fixes pour permettre l'accès à d'autres types de réseaux (filaires) [59].

1.4.3 Classification des réseaux mobiles selon l'infrastructure

les réseaux mobiles peuvent être divisés en deux classes [6] à savoir: les réseaux mobiles basés sur une infrastructure et les réseaux mobiles sans infrastructure.

1.4.3.1 Les réseaux mobiles avec infrastructure

En mode avec infrastructure, également appelé le mode BSS (*Basic Service Set*) certains sites fixes, appelés stations support mobile (*Mobile Support Station*) ou station de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec des sites ou unités mobiles (UM), localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule (voir la Figure 1.7).

A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, dans ce modèle, une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Les réseaux cellulaires (GSM, UMTS) peuvent être considérés comme étant une forme particulière de réseau avec station de base (ou points d'accès) [7].

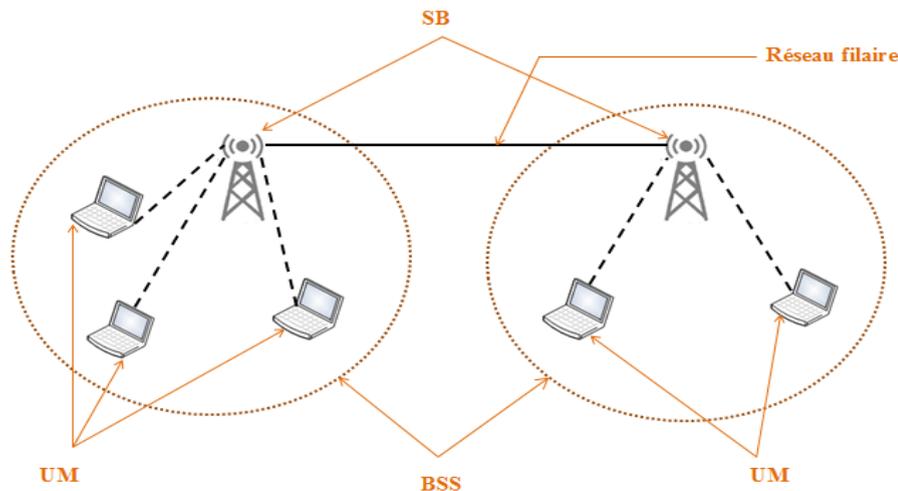


Figure 1.7: Exemple de mode infrastructure.

1.4.3.2 Les réseaux mobiles sans infrastructure

En mode sans infrastructure, également appelé le mode IBSS (*Independent Basic Service Set*) ou le mode ad hoc, tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe (point à point) en utilisant leurs interfaces de communication sans fil sans besoin d'un point d'accès (voir Figure 1.8). Il n'y a aucune infrastructure fixe. Les nœuds doivent être dans la portée de communication de chacun d'entre eux pour assurer les échanges [8].

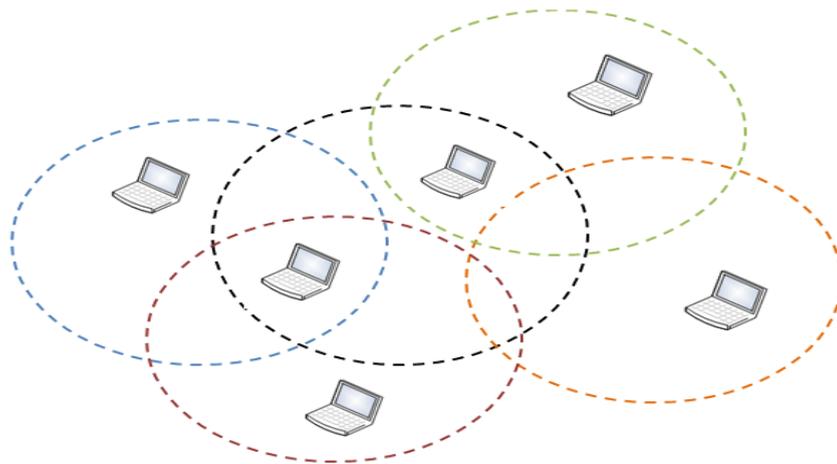


Figure 1.8: Exemple de mode ad Hoc.

1.5 les réseaux mobiles Ad hoc (MANET)

1.5.1 Définition

Généralement, un réseau MANET est formé de manière dynamique par un système autonome de nœuds mobiles connectés via des liens sans fil sans nécessiter d'infrastructure préexistante ni d'administration centralisée. Les nœuds sont libres de se déplacer aléatoirement et de s'organiser arbitrairement, donc la topologie du réseau peut changer rapidement et de façon imprévisible. Un tel réseau peut opérer dans un mode autonome, ou peut être relié à internet.

Les MANETs sont utiles dans beaucoup d'applications parce qu'ils n'ont pas besoin de support d'infrastructure [22]. Chaque nœud du réseau peut communiquer directement avec un autre nœud s'il est dans sa portée de transmission. Au-delà de

cette portée, les nœuds intermédiaires jouent le rôle de routeurs et participent à la découverte et la maintenance des routes entre les nœuds du réseau [25].

1.5.2 Historique et évolution des réseaux ad hoc

Historiquement, les réseaux mobiles ad hoc ont été principalement utilisés afin d'améliorer les communications dans le domaine militaire. L'armée visait alors le déploiement rapide de systèmes de communication dans des zones difficiles, telles que les champs de bataille. Les premières recherches sur les réseaux ad hoc ont démarré dans les années 60 au sein d'un organisme de l'armée américaine DARPA (*Defence Advanced Research Project Agency*)[59].

Les premières applications dans les réseaux ad hoc sont apparues avec le projet PRNet (*Packet Radio Network*) de DARPA en 1972, et avaient pour objectif de trouver une architecture de réseau radio facile à déployer pour l'échange de données tactiques. Différents algorithmes ont été développés dans le cadre de ce projet, mais ils étaient basés sur des réseaux ne comportant que quelques nœuds. Pour pallier aux principaux problèmes du projet PRNet, le projet SURAN (*SURvivable RAdio Network*) a été lancé en 1983. Son principal objectif était d'étendre les algorithmes développés par PRNet pour des réseaux plus larges [55].

Un autre projet IT (*Tactical Internet*) a été développé en 1997, qui est l'une des implémentations des réseaux mobiles ad hoc multi sauts. En 1999 ELB ACTD (*Extending the Littoral Battle-space Advanced Concept Technology Demonstration*) a été développé dont l'objectif était de démontrer la faisabilité de concepts militaires pour les communications des bateaux en mer aux soldats sur la terre par l'intermédiaire d'un relais aérien.

Aujourd'hui les recherches continuent avec encore plus de ferveur et d'enthousiasme suscitant beaucoup d'intérêt dans le domaine des réseaux sans fil [21] [15].

1.5.3 Modélisation d'un réseau Ad hoc

Un réseau ad hoc peut être modélisé par un graphe $G_t = (V_t, E_t)$ où " V_t " représente l'ensemble des nœuds (c'est-à-dire les unités ou les hôtes mobiles) du réseau et " E_t " modélise l'ensemble des connexions qui existent entre ces nœuds. Si $e = (u, v) \in E_t$, cela veut dire que les nœuds u et v sont en mesure de communiquer directement à l'instant t [22].

La Figure 1.9 représente un réseau ad hoc de douze unités mobiles sous forme d'un graphe :

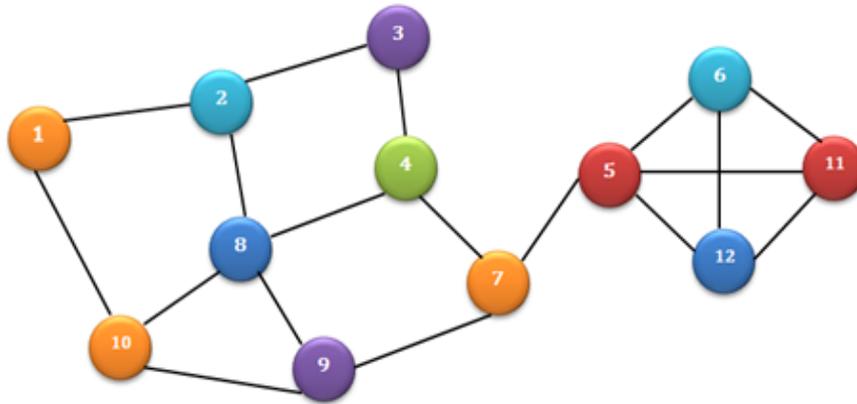


Figure 1.9: Modélisation d'un réseau ad hoc.

En raison de la mobilité des nœuds, un tel réseau subit fréquemment des changements topologiques. Ces derniers influent sur la distribution des liens entre les différents nœuds. En effet, la rupture des liaisons radio est très habituelle et imprévisible dans ce type de réseau. La Figure 1.10 illustre cet effet où le nœud 1, à l'instant $t+2$ disparaît du réseau du fait de la coupure du lien qui le relie au nœud 4.

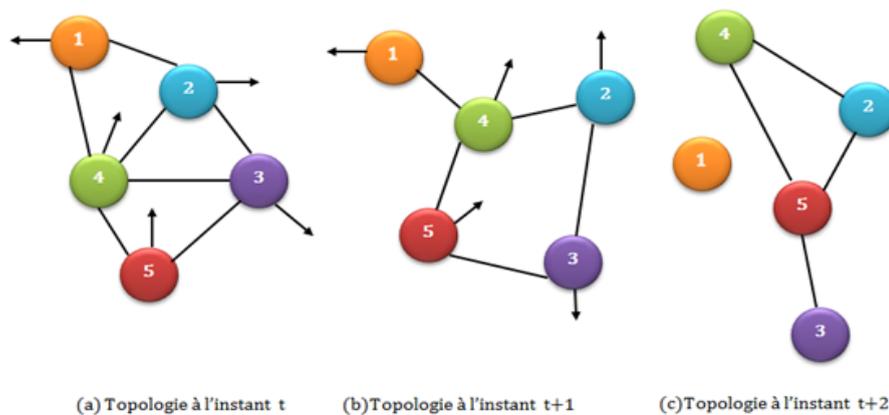


Figure 1.10: Mobilité dans les réseaux ad hoc.

1.5.4 Modes de communication

Les échanges de données dans les réseaux mobiles utilisent les modes de communications suivants [50]:

- La communication point à point ou *unicast* pour laquelle il y a une source et une seule destination ;
- La communication multipoint ou *multicast* qui permet d'envoyer un message à plusieurs destinataires;
- La diffusion ou *broadcast* qui envoie un message à tous les nœuds du réseau.

Ces trois modes de communication sont schématisés par la Figure 1.11 .

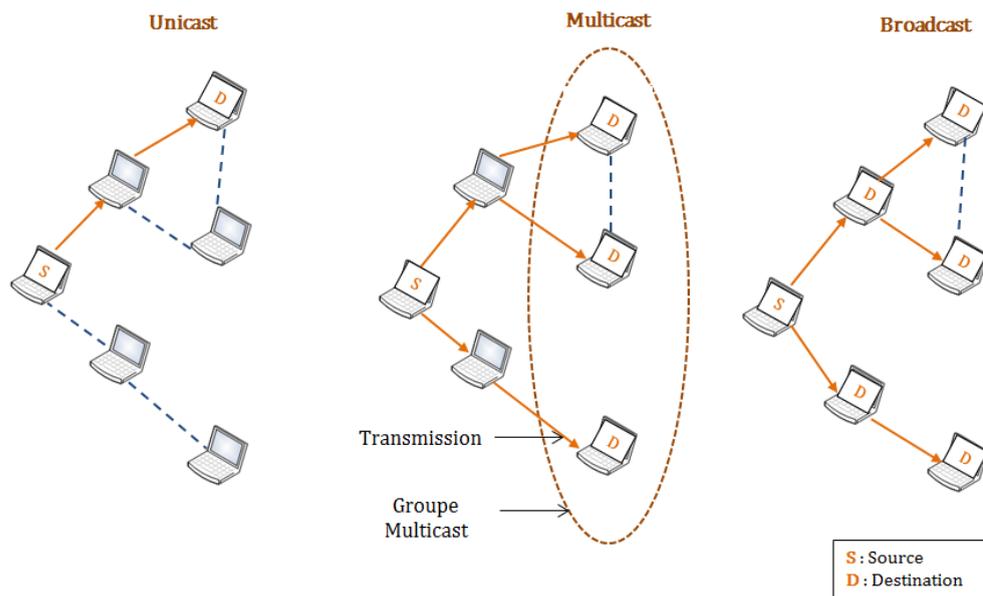


Figure 1.11: Modes de communication dans les réseaux mobiles.

1.5.5 Propriétés et spécificités des réseaux mobiles ad hoc

Les réseaux mobiles ad-hoc présentent plusieurs caractéristiques à savoir :

- **L'absence d'une infrastructure centralisée**

Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de toute administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables de l'établissement et du maintien de la connectivité du réseau de manière continue [22];

- **Une bande passante limitée**

Les nœuds dans les réseaux ad hoc utilisent une technologie de communication sans fil. Les liaisons sans fil auront toujours une capacité inférieure à leurs homologues filaires puisque le médium de communication est partagé (ondes radio). Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste [22].

En plus, le débit réel des communications sans fil après avoir déduit les effets des accès multiples, du bruit et des interférences, etc. est souvent inférieur au débit de transfert maximum de la liaison radio [25] ;

- **Contrainte d'énergie**

Les équipements mobiles disposent de batteries limitées, et dans certains cas très limitées tel que les PDA, et par conséquent d'une durée de traitement réduite. Sachant qu'une partie de l'énergie est déjà consommée par la fonctionnalité de routage. Cela limite les services et les applications supportées par chaque nœud [8];

- **Sécurité et vulnérabilité**

Les réseaux mobiles ad hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Dans ces derniers, fournir une sécurité au réseau paraît simple du fait de l'utilisation d'une administration centralisée [22]. Cependant, pour les réseaux ad hoc le principal problème ne se situe pas tant au niveau du support physique mais principalement dans le fait que tous les nœuds sont équivalents et potentiellement nécessaires au fonctionnement du réseau [8];

Les réseaux ad hoc n'ont pas un nœud qui joue le rôle de l'administrateur, de ce fait les modèles de sécurité des réseaux filaires sont inadaptés pour de tels réseaux. Pour pallier à ce problème, le contrôle des données transférées doit être minimisé pour préserver à la fois les ressources et l'énergie [22].

- **Topologie dynamique**

Les unités mobiles du réseau, se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Elles peuvent accéder au réseau ou en sortir. De ce fait, la topologie du réseau peut changer, à des instants imprévisibles de manière rapide et aléatoire, les liens de la topologie peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels [22]. Le changement de la topologie change les routes entre les nœuds et provoque la perte de paquets.

- **L'hétérogénéité des nœuds**

Un nœud mobile peut être équipé d'une ou de plusieurs interfaces radio ayant des capacités de transmission variées et opérant dans des plages de fréquence différentes. Cette hétérogénéité de capacité peut engendrer des liens asymétriques dans le réseau. De plus, les nœuds peuvent avoir des différences en terme de capacité de traitement (CPU, mémoire) de logiciel et de mobilité (lent, rapide). Dans ce cas, une adaptation dynamique des protocoles s'avère nécessaire pour supporter de telles situations [26].

1.5.6 Domaines d'applications des réseaux Ad Hoc

Le premier domaine d'application des réseaux ad hoc fut le domaine militaire où les différents groupes d'unités communiquaient ensemble par liaison radio. L'utilisation des réseaux ad hoc par les militaires s'explique par le caractère particulier de cette technologie qui est adaptée aux situations hostiles. Cependant, avec l'avancement des recherches dans le domaine des réseaux et l'émergence des technologies sans fil, d'autres applications civiles sont apparues. On distingue [26][1]:

- **Les services d'urgence**

Puisque ces réseaux ne nécessitent pas d'infrastructure, il est possible de l'utiliser dans le cadre des sinistres comme les tremblements de terre ou les incendies, ainsi les équipes de sauvetage peuvent communiquer bien que les infrastructures de communication classiques soient détruites;

- **Le travail collaboratif et les communications dans des entreprises ou bâtiments**

Dans le cadre d'une réunion ou d'une conférence, l'organisation est simplifiée par la non nécessité de câblage ou de travaux d'aménagements;

- **Home network**

Ce domaine a pour but de partager des applications et des communications des équipements mobiles;

- **Applications commerciales**

les réseaux ad hoc peuvent également être utilisés dans le cadre commercial pour former des réseaux locaux. En effet, la simplicité de la mise en place (pas de câblage et de travaux d'installation dans le bâtiment) se traduit par des économies intéressantes pour l'entreprise, pour un paiement électronique distant (taxi) ou pour l'accès mobile à l'Internet, ou service de guide en fonction de la position de l'utilisateur;

- **Réseaux de senseurs**

Ces réseaux destinés à mesurer les propriétés physiques des environnements (température, pression, climat, activité de la terre, suivi des mouvements des animaux,...), sont dispersés à grande échelle. Ils effectuent les mesures et les transmettent par l'intermédiaire d'un routage ad hoc le long du réseau ainsi formé ;

- **Réseaux en mouvement**

informatique embarquée et véhicules communicants;

- **Réseaux Mesh**

C'est une technologie émergente qui permet d'étendre la portée d'un réseau ou de le densifier.

D'une façon générale, les réseaux ad hoc sont utilisés dans toute application distribuée ou le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignante, soit parce que c'est difficile à mettre en place, soit parce que la durée d'installation du réseau ne justifie pas de câblage à demeure [100].

1.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la technologie de communication sans fil et le concept des environnements mobiles ad hoc. Nous avons présenté les notions de base nécessaires à la compréhension de la communication utilisée dans le nouvel environnement, à savoir : l'utilisation des ondes radio, les techniques de transmission de données, les techniques d'accès au médium, etc. Le but de ce chapitre a été de donner un aperçu général sur cette technologie qui ne cesse de croître. Après avoir présenté l'environnement mobile ad hoc, une étude sur le routage dans cet environnement sera développée dans le chapitre suivant.

2

Routage dans les réseaux mobiles ad hoc

2.1 Introduction

Les réseaux ad hoc que nous considérons sont multi-sauts. De ce fait, il peut arriver qu'un nœud mobile veuille communiquer avec un autre qui n'est pas dans sa portée de communication directe. Les paquets de messages vont devoir être transmis de proche en proche jusqu'à la destination. La gestion de l'acheminement des données s'appelle "le routage", qui est un mécanisme clé des réseaux ad hoc. Le routage peut être défini comme le moyen d'ouverture et d'entretien d'une communication entre deux nœuds. Il est alors important d'avoir un protocole de routage efficace qui permet de tirer parti du potentiel des réseaux ad hoc [60].

Durant ces dernières années plusieurs protocoles de routage pour les réseaux ad hoc ont été développés [102]. Ces protocoles doivent être totalement distribués, c'est-à-dire qu'aucune entité du réseau ne doit centraliser à son niveau le contrôle des communications. En plus, les protocoles doivent prendre en considération les changements imprévisibles et rapides de la topologie ainsi que les caractéristiques du réseau ad hoc.

Ce chapitre est consacré à une étude du routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Il introduit les différents concepts liés au routage dans les MANETs et les contraintes qui leur sont inhérentes. Nous présentons aussi une classification des protocoles existants (proactifs, réactifs, hybrides et géographiques) ainsi qu'une description des protocoles les plus représentatifs.

2.2 Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc

2.2.1 Définition

Le routage est l'élément primordial d'un réseau ad hoc. Généralement, le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Dans les réseaux ad hoc il n'existe aucune infrastructure fixe ou élément central qui peut gérer le routage. Chaque nœud doit donc participer à un protocole de routage qui lui permet de découvrir les chemins existants afin de communiquer avec les autres nœuds du réseau [27].

Le protocole de routage consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, la connexion entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau. Cette stratégie doit prendre en considération certaines caractéristiques (les changements de la topologie du réseau, la bande passante, le nombre de liens et la limitation d'énergie, etc.) [28]. Le but principal des protocoles de routage est l'établissement et la maintenance des routes optimales correctes et efficaces, pour que les messages soient correctement délivrés à leurs destinations dans le réseau [26].

2.2.2 Problématique du routage dans les réseaux ad hoc

Les diverses contraintes qui caractérisent les réseaux mobiles ad hoc rendent l'application des protocoles de routage traditionnellement déployés dans les réseaux filaires inefficace, les principaux problèmes qui se posent sont [29]:

-La capacité limitée des liens (liens radio): un protocole de routage ad hoc doit être efficace en terme de bande passante utilisée. Il doit minimiser le trafic de contrôle (overhead) nécessaire à l'établissement et à la maintenance des routes afin de réduire la charge sur le réseau ;

-La nature variable des liens (unidirectionnelle ou bidirectionnelle): elle doit être prise en compte par le protocole de routage ;

-Les ressources matérielles restreintes des unités mobiles excluent les algorithmes exigeants en capacité de mémoire et de traitement ;

-Les changements fréquents dans la topologie: l'algorithme d'obtention d'une route doit prendre en compte la mobilité des nœuds et rechercher la route la plus courte en nombre de sauts. En effet, le déplacement des unités mobiles peut remettre en cause la validité des informations de routage ;

-L'absence d'infrastructure ou d'administration fixe dans le réseau impose, par ailleurs, un fonctionnement distribué.

2.2.3 Les contraintes de routage dans les réseaux ad hoc

L'étude et la mise en œuvre d'algorithmes de routage pour assurer la connexion des réseaux ad hoc au sens classique du terme (tout sommet peut atteindre tout autre), est un problème complexe. L'environnement est dynamique et évolue au cours du temps, la topologie du réseau peut alors changer fréquemment. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive prendre en compte les problèmes suivants [30] [31]:

- **Minimiser la charge du réseau**

l'optimisation des ressources du réseau renferme deux autres sous problèmes qui sont l'évitement des boucles de routage, et l'empêchement de la concentration du trafic autour de certains nœuds ou liens ;

- **Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables**

Dans les MANETs, les chemins peuvent évoluer rapidement et d'une manière imprévisible. Ceci ne doit pas avoir d'incidents sur le bon acheminement des données. La disparition d'un lien, pour cause de panne ou de mobilité devrait, idéalement, augmenter le moins possible les temps de latence ;

- **Assurer un routage optimal**

La stratégie de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets de messages tout en prenant compte les différentes métriques de coûts (bande passante, nombre de liens, ressources du réseau, etc.). Si la construction des chemins optimaux est un problème dur, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, la stratégie de routage doit assurer une maintenance efficace des routes avec le moindre coût possible ;

- **Améliorer Le temps de latence**

Si la connectivité du réseau augmente alors la qualité des temps de latence et de chemins doit augmenter aussi.

2.3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad hoc

Les protocoles de routage destinés aux réseaux mobiles ad hoc peuvent être classés de différentes manières, selon plusieurs critères. Ils peuvent être classés selon leurs architectures (uniformes ou non uniformes), leurs approches de routage (protocole proactif, réactif, hybride ou géographique), leur type d'algorithmes dynamiques (vecteur distance ou état de lien) ou algorithmes à la demande (source ou apprentissage en arrière).

2.3.1 Classification selon l'architecture

La première classification des protocoles de routage ad hoc concerne le type de vision qu'ils ont du réseau et les rôles qu'ils accordent aux différentes unités mobiles. Ce critère divise les protocoles de routage en deux classes :

2.3.1.1 Les protocoles de routage uniformes

Les protocoles de routage uniformes "à plat" considèrent que tous les nœuds sont égaux (figure 2.1), dans le même niveau hiérarchique et possèdent ainsi, les mêmes rôles et fonctions. Par conséquent, aucune hiérarchie n'est définie entre les nœuds du réseau, chaque nœud envoie et reçoit des messages de contrôle de routage. La décision d'un nœud de router des paquets pour un autre dépendra de sa position [22].

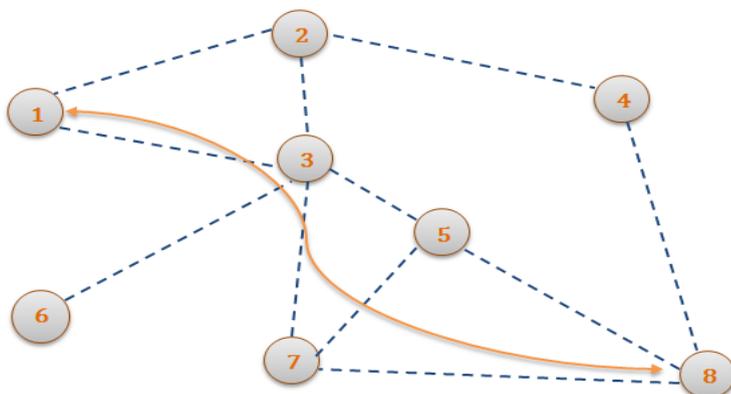


Figure 2.1: Routage plat.

2.3.1.2 Les protocoles de routage non uniformes

Les protocoles de routage non uniformes [13][22] "hiérarchiques" tentent de limiter la complexité du routage en réduisant le nombre de nœuds qui contribuent à la détermination des routes. Ils fonctionnent en confiant aux mobiles des rôles qui varient de l'un à l'autre. Une structure hiérarchique entre les nœuds est définie selon leurs fonctions. Certains nœuds sont élus et assument des fonctions particulières qui conduisent à une vision en plusieurs niveaux de la topologie du réseau.

Par exemple, un mobile pourra servir de passerelle pour un certain nombre de nœuds qui sont reliés à lui. Le routage en sera simplifié, puisqu'il se fera de passerelle à passerelle, jusqu'à la destination. Un exemple est donné par la figure 2.2, où le nœud 1 passe par les passerelles P1, P2 et P3 pour atteindre le nœud 7.

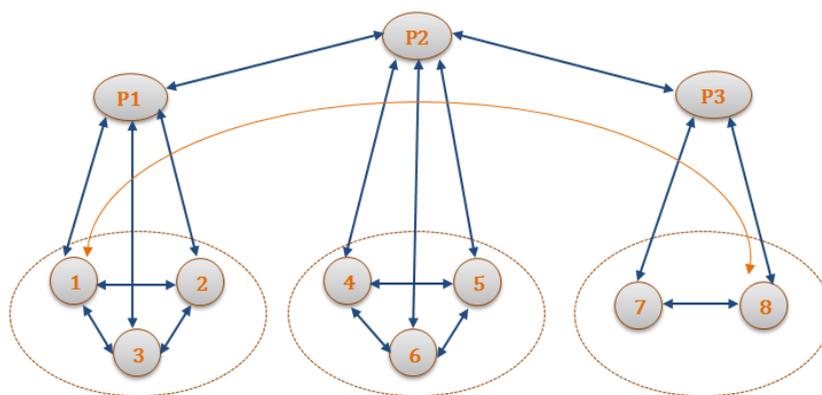


Figure 2.2: Routage hiérarchique.

2.3.2 Classification selon l'approche de routage

Dans cette classification basée sur le mécanisme d'établissement de la route nous distinguons deux grandes catégories: le routage proactif et le routage réactif. A ces deux familles, on ajoutera d'autres propositions plus ou moins hybrides impliquant par exemple la création de structure interne au réseau, ou s'appuyant sur la supposition que chaque nœud du réseau connaît sa position dans un plan [57].

2.3.2.1 Les protocoles proactifs

Un protocole de routage est dit proactif si les procédures de création et de maintenance des routes, durant la transmission des paquets de données, sont contrôlées périodiquement.

Dans le routage proactif, chaque nœud maintient une ou plusieurs tables contenant l'information de routage vers chacun des autres nœuds du réseau. Tous les nœuds mettent leurs tables à jour de façon à maintenir une vue consistante et réelle du réseau. Lorsque la topologie du réseau change, les nœuds propagent des messages de mise à jour à travers le réseau afin de garder cette consistance et de garder à jour l'information de routage pour l'ensemble du réseau. Ces protocoles diffèrent sur la manière par laquelle des changements de topologies sont distribués à travers le réseau et sur le nombre de tables nécessaires au routage [33] [15].

Il existe plusieurs protocoles connus de cette catégorie, à titre d'exemples, nous pouvons citer DSDV [55], OLSR [34], GSR [35], WRP [40], FSR [37], CGSR [39].

2.3.2.2 Les protocoles réactifs (à la demande)

Dans ces protocoles, la mise à jour ou le contrôle des routes se fait à la demande, c'est-à-dire, lorsqu'une source veut transmettre des paquets de données vers une destination. Les protocoles réactifs représentent les protocoles les plus récents proposés dans le but d'assurer le service de routage dans les réseaux sans fil [22]. Ces protocoles suivent une politique radicalement opposée à celle des protocoles proactifs. Ici aucune maintenance régulière n'est effectuée [8].

Les protocoles de routage appartenant à cette catégorie, créent et maintiennent les routes selon leurs besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte globale de routes est lancée, et ce, dans le but d'obtenir une information spécifique. Cette information reste valide tant que la destination est joignable ou jusqu'à ce que la route devienne inutile [19]. A titre d'exemples, les protocoles

appartenant à cette catégorie sont DSR [62], AODV [58], TORA[43], SSA [47], LMR [41] et ABR [46].

2.3.2.3 Les protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux approches: celle des protocoles proactifs et celle des protocoles réactifs. Généralement le réseau est divisé en deux zones et le principe est d'utiliser une approche proactive pour avoir des informations sur les voisins les plus proches, qui se trouvent au maximum à deux sauts du noeud mobile. Une approche réactive est utilisée au-delà de cette zone prédéfinie afin de chercher des routes [22].

L'avantage de cette catégorie de protocoles est le fait qu'elle s'adapte bien aux réseaux de grandes tailles. Cependant, cette approche a comme inconvénient de cumuler les points faibles des protocoles réactifs et ceux des protocoles proactifs, tels que les messages de contrôle périodiques et le coût d'établissement d'une nouvelle route. Il existe plusieurs protocoles connus appartenant à cette catégorie de protocoles hybride, citons ZRP [48], CBRP [53] et le protocole ZHLS [54] .

2.3.2.4 les protocoles géographiques

Les protocoles de routage géographiques se différencient de ceux précédemment présentés par l'utilisation d'une donnée supplémentaire dans la recherche des routes: la position géographique des nœuds du réseau afin d'améliorer le processus de routage. Un système de localisation est donc mis en place afin de connaître à un instant donné la position des mobiles. Le GPS (*Global Positioning System*) est le système de localisation le plus utilisé même si d'autres algorithmes proposent de calculer la position des mobiles à l'aide d'autres paramètres comme par exemple la puissance du signal. Une fois que la position du mobile destinataire est évaluée, la diffusion des messages de recherche de route peut être orientée vers une direction précise, réduisant considérablement le trafic de découverte de route [22]. Nous donnons des exemples représentatifs des protocoles géographiques, le protocole LAR [49], DREAM [51] et GPSR [52].

2.3.3 Classification selon l'algorithme utilisé

Une autre classification basée sur le type d'algorithme utilisé est possible pour les protocoles de routage ad hoc. il existe deux grandes familles d'algorithmes de routage dynamique avant la demande (vecteur de distance ou état de liens) et deux

grandes familles de routage dynamique à la demande (source ou apprentissage en arrière).

2.3.3.1 les protocoles à état de lien (*Link State Protocols*) [33]

Dans cette méthode, chaque nœud garde une vision de toute la topologie du réseau, et ce, par l'intermédiaire des requêtes périodiques portant sur l'état des liaisons avec les nœuds voisins. En effet la mise à jour dans cette méthode se fait pour chaque nœud en diffusant périodiquement l'état des liens des nœuds voisins dans le réseau. Cette opération est aussi faite en cas de changement dans l'état des liens. Cette approche permet de trouver rapidement des alternatives pour transmettre les paquets en cas de coupure d'une route, mais la quantité d'informations à stocker et à diffuser peut devenir considérable si le réseau contient un grand nombre de nœuds. En général cette méthode se base sur le principe de l'algorithme de Dijkstra [61] pour le calcul des chemins les plus courts entre un nœud source et les autres nœuds du réseau.

2.3.3.2 les protocoles à vecteur de distance (*Distance Vector Protocols*)

Dans cette méthode par contre, chaque nœud diffuse à ses nœuds voisins sa vision des distances qui le séparent de tous les hôtes du réseau. En se basant sur les informations reçues par tous ses voisins, chaque nœud de routage fait un certain calcul pour trouver le chemin le plus court vers n'importe quelle destination. Le processus de calcul se répète, s'il y a un changement de la distance minimale séparant deux nœuds, et cela jusqu'à ce que le réseau atteigne un état stable [33]. Les calculs des routes se basent sur le principe de l'algorithme distribué de Bellman-Ford (DBF).

2.3.3.3 les protocoles de routage par la source [21]

Dans ce type de protocoles, le nœud source détermine toute la liste des nœuds par lesquels doit transiter le message, ainsi le nœud émetteur inclut dans l'en-tête du paquet une route source. En effet, afin de construire la route, le nœud source doit préciser les adresses exactes des nœuds par lesquels le message transitera jusqu'à atteindre le destinataire. Ainsi, le nœud source transmet le paquet au premier nœud spécifié dans la route. Notons que chaque nœud par lequel le paquet transite supprime son adresse de l'en-tête du paquet avant de le retransmettre. Une fois que le paquet arrive à sa destination, il sera délivré à la couche réseau du dernier hôte.

2.3.3.4 les protocoles de routage par apprentissage en arrière [21]

Le mécanisme d'apprentissage en arrière ou le "*backward learning*" est basé sur le fait que lorsqu'un nœud source veut transmettre un message à une destination précise, il procède tout d'abord à l'opération d'inondation de sa requête sur tout le réseau. Ainsi, chaque nœud intermédiaire, dit de transit, indique le chemin au nœud source lors de la réception de la requête. On dit qu'il " apprend " le chemin au nœud source, tout en sauvegardant la route dans la table transmise. Enfin, lorsque la requête arrive à bon port, le nœud destinataire, et suivant le même chemin, transmet sa réponse sous forme de requête. Notons que le chemin établi entre les nœuds est un chemin bidirectionnel ; signalant aussi que la source garde trace du chemin tant qu'il restera en cours d'utilisation une fois que le chemin sera calculé.

2.4 Description de quelques protocoles MANETs

2.4.1 Le protocole de routage DSDV

DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*) [55] fait partie de la famille des protocoles de routage proactif à vecteur distance, basé sur l'algorithme distribué de Bellmen-Ford. DSDV utilise les propriétés de la diffusion pour transmettre les informations de routage. Périodiquement, chaque station diffuse l'ensemble de sa table de routage suivie d'un numéro pour dater l'information. Ce numéro est appelé "numéro de séquence". A partir de deux numéros de séquence, il est possible de déterminer quelle information est la plus récente.

La table de routage d'un nœud contient les informations liées à chaque route. A la réception de ces informations, les voisins mettent à jour leur table de routage en suivant un schéma bien précis. Toute entrée de la table de routage est mise à jour, seulement, si l'information reçue est plus récente. A terme, le protocole DSDV fournit pour chaque destination, la route qui possède le plus faible nombre de nœuds.

le protocole DSDV doit maintenir l'état des chemins. Pour cela, les nœuds détectent les ruptures de lien. Chaque nœud émet, périodiquement, ses informations de routage à l'ensemble de ses voisins. Si pendant un certain temps, un nœud ne reçoit plus les informations de routage d'un nœud voisin c'est que ce dernier ne fait plus partie de son voisinage. Un lien coupé affecte l'ensemble des routes utilisant ce lien. Un nœud, décelant une coupure, diffuse un paquet contenant l'ensemble des destinations ne pouvant plus être atteint à travers ce lien. Tout nœud, recevant un tel

paquet, le propage immédiatement pour faire connaître au plus vite le changement de topologie.

2.4.2 Le protocole de routage DSR

DSR (*D*ynamic *S*ource *R*outing) [62] est un protocole réactif. Il se différencie des autres en particulier parce qu'il pratique le source routing : l'émetteur précise dans l'en-tête de chaque paquet la liste des nœuds qu'il devra traverser pour atteindre sa destination. Ce type de routage présente certains avantages particulièrement intéressants ; il autorise en particulier la source à conserver dans sa table de routage plusieurs chemins valides vers une même destination. Le choix du chemin emprunté pourra donc être fait indépendamment pour chaque paquet, et permettre un meilleur équilibrage de la charge du réseau ou une meilleure réactivité aux changements de topologie.

Dans la pratique, DSR est structuré en deux sous-parties complémentaires: la recherche de route et la maintenance de route. La recherche de route se fait par inondation: un paquet de recherche est diffusé de proche en proche jusqu'à la destination. Au fur et à mesure, les identifiants des nœuds traversés sont ajoutés dans le paquet de recherche de route. Quand elle reçoit ce paquet, la destination sait donc déjà quel chemin il a emprunté, et obtient ainsi (en l'inversant) la route pour retourner à la source. A la réception, les paquets de recherche ayant suivi des chemins différents, la destination répond sur les chemins inverses, et la source aura ainsi finalement plusieurs chemins valides pour l'atteindre [57].

2.4.3 Le protocole de routage AODV

Le protocole AODV (*A*d hoc *O*n-*D*emand *D*istance *V*ector *R*outing *P*rotocol) est un protocole de routage avec vecteur de distance à la demande qui représente une amélioration du protocole DSDV [55] en réduisant le nombre de messages diffusés par la création de routes à la demande. Comme pour le protocole DSR [62], le protocole AODV [58] est basé sur deux mécanismes : la découverte et la maintenance de route et introduit en plus du routage nœud par nœud, le principe des numéros de séquence (pour maintenir la consistance des informations de routage) et les échanges périodiques de DSDV. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus récentes.

Comme pour DSR, AODV utilise une requête de route RREQ dont le but est de

créer un chemin vers une destination qui répond par une réponse de route RREP. Par ailleurs, le protocole AODV, comme le protocole DSR, n'assure pas l'utilisation du meilleur chemin existant. Une évaluation des performances de ce protocole montre qu'il n'y a pas de grandes différences entre les routes utilisées par AODV et celles utilisées par les autres protocoles qui cherchent les plus courts chemins. Ce protocole évite le problème du comptage à l'infini (*counting to infinity*), ce qui offre une meilleure convergence lors des changements de la topologie.

2.4.4 Le protocole de routage ZRP

ZRP (*Zone Routing Protocol*) [48] est un protocole hybride qui définit pour chaque nœud mobile une zone (en terme de nombre de sauts) dans laquelle les paquets seront routés en utilisant une approche proactive (figure 2.3). Cependant, les routes en dehors de cette zone sont découvertes en utilisant une approche réactive. Une zone de routage est alors définie pour chaque nœud mobile. Cette zone inclut les voisins se trouvant à une distance minimale (inférieure ou égale au rayon de la zone) du nœud en terme de nombre de sauts.

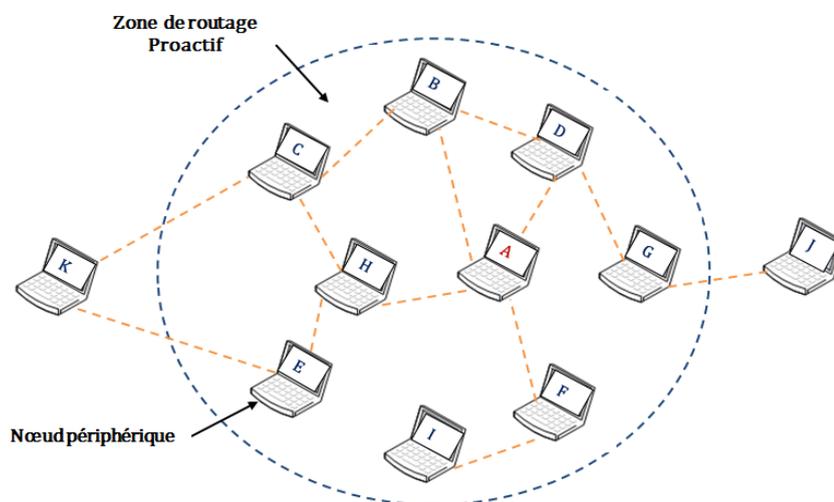


Figure 2.3: Zone de routage du nœud A définie par ZRP.

L'espace de travail de ZRP est défini localement par le protocole de routage intra-zone IARP (*IntraZone Routing Protocol*) et pour le reste du réseau par le protocole de routage inter-zone IERP (*IntErzone Routing Protocol*).

2.4.5 Le protocole de routage CBRP

Le protocole CBRP [53] (*Cluster Based Routing Protocol*) est basé sur la création de groupes (*clusters*) au sein du réseau. Les nœuds peuvent se voir attribuer des rôles particuliers au sein du réseau grâce à l'échange de message "Hello". Un nœud peut être élu chef de groupe (*cluster-head*), ou passerelle (*gateway*) entre groupes (voir la Figure 2.4) suivant sa situation dans le réseau, principalement sa visibilité des autres nœuds. Les routes sont établies à la demande, comme pour un protocole réactif mais uniquement par les chefs de groupe : si un nœud veut envoyer un message, il demande à son responsable de groupe de lui déterminer la route à suivre. La route trouvée est agrégée au fur et à mesure du message de découverte et le nœud destinataire connaît ainsi le chemin de retour.

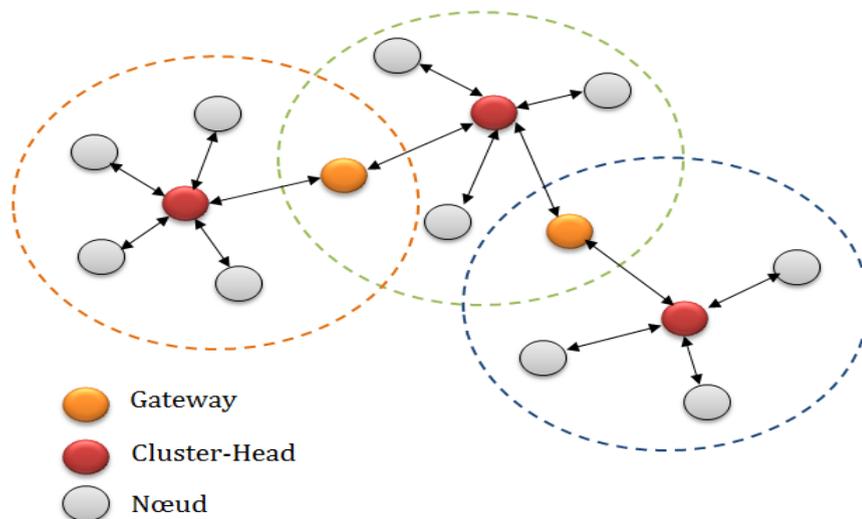


Figure 2.4: Les différents types de nœuds dans le protocole CBRP.

2.4.6 Le protocole de routage ZHLS

Le protocole "Routage à Etat de Liens Hiérarchique basé sur les Zones", appelé ZHLS (*Zone-Based Hierarchical Link State Routing*) [54], est basé sur la décomposition du réseau en un ensemble de zones. Dans ce protocole, les membres d'une zone n'élisent pas de représentants, contrairement à ce qui se fait dans les autres protocoles hiérarchiques. Avec cette décomposition, on a deux niveaux de topologies: le niveau nœud, et le niveau zone. La topologie basée sur le premier niveau, donne la façon dans laquelle les nœuds, d'une zone donnée, sont connectés physiquement. Un lien virtuel peut exister entre deux zones, s'il existe au moins un nœud de la première zone, qui soit physiquement connecté à un nœud de l'autre zone.

2.4.7 Le protocole de routage LAR

Le protocole appelé "Routage aidé par la localisation" ou LAR (*Location-Aided Routing*) [49], est un protocole de routage réactif basé sur l'utilisation des localisations. Ce protocole procède d'une manière très similaire au protocole DSR (vu dans la section 2.4.2). La principale différence entre les deux protocoles réside dans le fait que le LAR utilise les informations de localisations, fournies par le système de positionnement global appelé GPS (*Global Positioning System*), dans le but de limiter l'inondation des paquets de requête de route. Afin d'assurer cela, deux approches LAR1 et LAR2 [50] peuvent être utilisées. Dans la première approche, le nœud source définit une région circulaire dans laquelle la destination peut être localisée. La position et la taille de la région, sont estimées en se basant sur :

1. La position de la destination, telle qu'elle est connue par la source.
2. L'instant qui correspond à cette position.
3. La vitesse moyenne du mouvement de la destination.

La version LAR2 ne repose pas sur la détermination de la zone de recherche, mais sur le choix du plus court chemin en terme de distance entre la source et la destination. Chaque nœud envoie l'information de recherche de route vers son voisin le plus proche (en distance) de la destination finale.

2.4.8 Le protocole de routage DREAM

Le protocole de routage DREAM [51] (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*) est conceptuellement proche des protocoles de routage proactifs. Chaque nœud du réseau dispose d'une table de positions qui peut être assimilée aux tables de routage des nœuds utilisées par un protocole proactif.

Pour cela, chaque nœud envoie des informations relatives à sa localisation, à tous les nœuds du réseau. Plus précisément, partant du principe qu'un nœud perçoit moins la mobilité d'un autre nœud lorsque ce dernier est éloigné, et donc que l'impact de cette mobilité est moins important au niveau du routage, les notifications de changements de position sont moins souvent diffusées au nœud lointain qu'elles ne le sont aux nœuds proches. Par ailleurs, les nœuds caractérisés par une forte mobilité diffusent plus souvent leur coordonnées géographiques que les autres.

2.4.9 Le protocole de routage GPSR

Le protocole de routage GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [52] est proche dans l'esprit de LAR2 [49]. Ce protocole détermine la route à suivre en minimisant les distances entre les nœuds et la destination tout comme LAR2 (c'est le mode "*Greeding Packet Forwarding*"), mais un second mécanisme est mis en œuvre en cas de blocage (c'est le mode "*Perimeter*"). Dans ce cas, le nœud n'ayant pas de voisin plus proche (en distance) que lui de la destination passe le relais à ses voisins qui eux peuvent avoir un voisin plus proche de la destination.

2.5 Etude détaillée du protocole OLSR

Le protocole OLSR [34] (*Optimized Link State Protocol*) a été proposé par l'INRIA dans le cadre du projet HIPERCOM. le protocole OLSR appartient à la famille des protocoles à état de liens. La particularité de ce dernier par rapport à sa famille d'origine est l'utilisation de la topologie partielle. En d'autre terme, les nœuds ne diffusent pas tous les liens qu'ils ont avec leurs voisins , mais seulement un sous-ensemble de ces liens qui permettent de les joindre. Ceci implique une réduction de la taille des paquets de contrôle diffusés sur le réseaux .

Le protocole OLSR se base sur la technique des relais multipoints (MPR *multi-point relay*). Cette technique permet de limiter localement le nombre de retransmissions lors d'une inondation. elle permet ainsi d'optimiser les diffusions des messages de contrôle dans le réseaux et la consommation de la bande passante. Afin de maintenir la connaissance de la topologie, les nœuds OLSR s'échangent périodiquement des paquets de contrôle et maintiennent des routes pour atteindre tout nœud OLSR du réseau. Le protocole OLSR repose sur deux mécanismes principaux à savoir la détection du voisinage et la gestion de la topologie [83].

2.5.1 Détection de voisinage

La détection de voisinage se fait à l'aide des paquets Hello. Les informations de voisinage sont maintenues dans des tables. Ces dernières sont mises à jour à chaque processus de réception de messages de contrôle et stockées à chaque envoi.

- Table des voisins (*Neighbor Set*)

Tous les voisins à un saut sont enregistrés dans cette table. Elle est mise à jour d'une manière dynamique à travers les données de Link Set. Elle stocke les voisins à liens symétriques et asymétriques;

- Table des voisins à deux sauts (*2-hop Neighbor Set*)

Cette table est caractérisée par le stockage des adresses des nœuds accessibles à travers les chemins à un seul saut ;

- Ensemble des sélecteurs MPR (*MPR Selector Set*)

Cette table contient tous les nœuds qui ont sélectionné le nœud local comme MPR.

Les messages Hello jouent trois rôles dans le protocole OLSR. En fait, les messages Hello sont envoyés vers tous les voisins à un seul saut pour la détection des liens (*Link sensing*), des voisins (*neighbor sensing*), voisin à deux sauts (*two hop sensing*) et la déclaration des nœuds sélecteurs de relais (*MPR selector sensing*) [34].

2.5.1.1 La détection de l'état de liens

Pour accomplir cette tâche, le protocole OLSR recourt à l'émission de messages Hello. Un exemple simple de découverte de voisinage est donné par la figure 2.5. **A** envoie un Hello vide, à sa réception par **B**, ce dernier enregistre **A** comme étant un voisin asymétrique du fait qu'il ne trouve pas sa propre adresse dans ce message. Par la suite, il va envoyer après deux secondes un message Hello en y incluant l'adresse de **A**. Lorsque celui-ci le reçoit, il va y trouver sa propre adresse, donc **B** sera déclaré comme étant un lien symétrique. **A** va l'inclure dans la suite de l'adresse de **B** dans le message Hello et **B** va enregistrer **A** comme étant un voisin symétrique, à la réception de ce message.

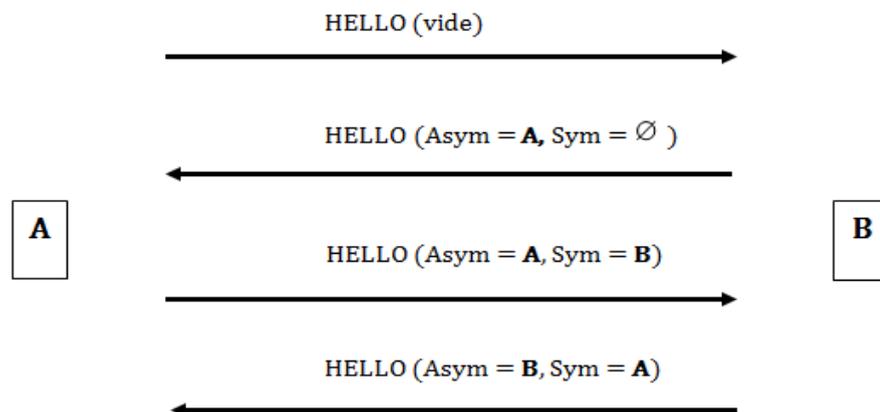


Figure 2.5: Détection de voisinage par l'échange de message HELLO.

2.5.1.2 La détection des voisins directs

la détection des voisins permet de remplir le table des voisins directs et utilise pour cela l'adresse principale des nœuds. A chaque fois qu'une nouvelle entrée est détectée lors de changement de l'état du lien, la table est mise à jour. Un voisin est dit symétrique s'il existe au moins un lien bidirectionnel dans la table de liens qui permet de connecter une interface locale vers une interface des voisins. Une fois qu'une défaillance à ce niveau est signalée, son entrée correspondante dans la table des voisins est aussi détruite .

2.5.1.3 La déclaration des MPRs selector

Elle consiste à informer le nœud local qu'il a été choisi comme un MPR. Après la réception du message Hello, un nœud met à jour l'ensemble des nœuds l'ayant sélectionné comme MPR (*MPR Selector Set*).

2.5.1.4 Format du message Hello

Le format des messages Hello est donné par la figure 2.6 [34]:

0	7 8	15 16	23 24	31
Reserved		Htime	Willingness	
Link Code	Reserved		Link Message Size	
Neighbor Interface Address				
Neighbor Interface Address				
...				
Link Code	Reserved		Link Message Size	
Neighbor Interface Address				
Neighbor Interface Address				
...				
...				

Figure 2.6: Format du message Hello.

les champs du message Hello sont définis comme suit :

-*Reserved* : ce champ doit être mis à " 0000000000000 " pour être conforme à cette spécification ;

-*HTime* : ce champ spécifie l'intervalle d'émission des messages Hello utilisés par cette interface ;

-*Willingness* : ce champ traduit la volonté du nœud à transmettre le trafic des autres nœuds. Un nœud avec " willingness= WILL_NEVER " ne doit jamais être sélectionné comme MPR par aucun nœud. Un nœud avec " willingness= WILL_ALWAYS" doit toujours être sélectionné comme MPR. Par défaut un nœud doit avoir " willingness= WILL_DEFAULT" ;

-*Link Code* : ce champ contient des informations à propos du lien entre l'interface émettrice et la liste qui suit des interfaces voisines. Il contient aussi des informations à propos du statut de ces voisins (voir Figure 2.7): *Neighbor Type* qui prend les valeurs 0,1,2,3 pour indiquer respectivement le manque d'informations sur le lien en question, ou qu'il est symétrique, asymétrique ou défaillant et *Link Type* indique si le lien relie le nœud vers son voisin direct symétrique, un MPR, un non disponible ;

7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	Neighbor Type		Link Type	

Figure 2.7: Format du champ Link Code.

-*Link Message Size* : compté en octet et mesuré à partir du début du champ *Link Code* jusqu'au suivant champ *Link Code*;

-*Neighbor Interface Address* : l'adresse de l'interface d'un nœud voisin.

2.5.2 La technique de relais multipoints

Le concept des relais multipoints vise à réduire le nombre de retransmissions inutiles, lors de la diffusion généralisée d'un message. En particulier, les MPRs permettent l'acheminement des messages de contrôle sur le réseau d'où une optimisation de la diffusion classique (voir Figure 2.8). Chaque nœud du réseau va sélectionner, indépendamment des autres nœuds, son propre ensemble de relais multipoints en se basant sur la connaissance de son voisinage à deux nœuds. le nœud doit , par la suite informer ses voisins de leur nouveau rôle. Dans un environnement mobile avec une topologie changeante d'une manière imprévisible, comme c'est le cas des réseaux

ad hoc, cet ensemble de MPR doit être recalculé à chaque fois que l'on détecte une modification dans le voisinage à deux sauts.

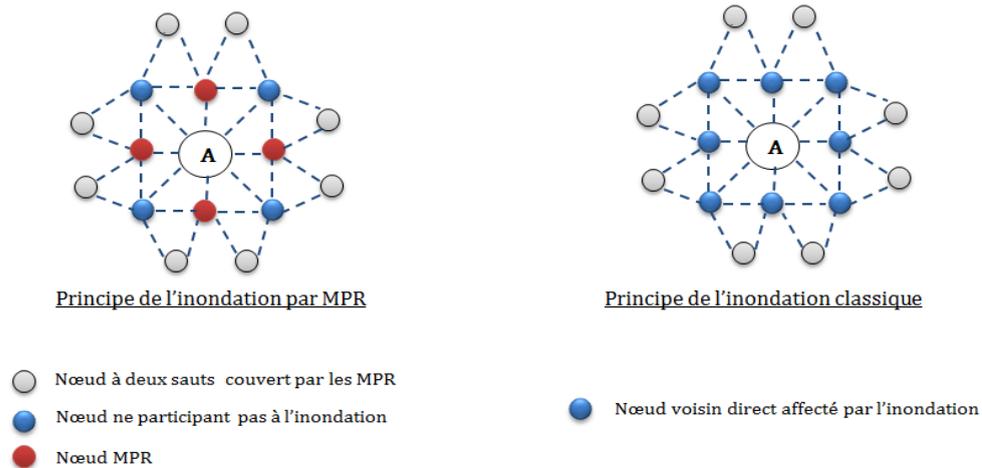


Figure 2.8: Principes de l'inondation classique et par MPR.

L'algorithme de cette heuristique se présente comme suit :

Etape 1: Commencer par un ensemble vide de relais multipoints $MPR(x) = \emptyset$;

Etape 2: Calculer le degré (le nombre de voisins à liens symétriques) pour tout nœud y "D(y)" appartenant à l'ensemble des voisins à un saut ;

Etape 3: Ajouter à l'ensemble de relais multipoints $MPR(x)$, les nœuds voisins à un saut $N(x)$ qui sont les seuls à pouvoir acheminer le trafic à un élément de l'ensemble des voisins à deux sauts ($N2(x)$) et éliminer par la suite les nœuds couverts dans ce dernier ;

Etape 4: Tant que $N2(x) \neq \emptyset$

Etape 4.a: Pour chaque nœud $y \in N(x)$ qui n'appartient pas à $MPR(x)$, calculer son degré;

Etape 4.b: Sélectionner le nœud ayant la plus grande valeur de $N_willingness$ avec un maximum de degré comme MPR et l'ajouter à $MPR(x)$ puis retirer de $N2(x)$ tous les nœuds couverts par celui-ci.

Etape 5: L'ensemble des MPR d'un nœud est constitué par la réunion des différents MPR .

2.5.3 Gestion de la topologie

La gestion de la topologie pour le protocole OLSR se fait via des messages de contrôle qui permettent la fois de détecter les voisins et de choisir ses MPR qui lui

permettent de disséminer ses informations de contrôle dans le réseau. Si un nœud possède plusieurs interfaces, alors il doit envoyer ces informations de contrôle sur toutes ses interfaces. les routes sont construites par la suite en utilisant les relais multipoints et les liens directs avec les voisins.

2.5.3.1 le message TC et la base d'informations topologiques

Ce message est diffusé périodiquement par chaque MPR. Il contient la liste des voisins l'ayant choisi comme MPR (voir Figure 2.9). Cette information est importante, vu que les chemins sont faits à base de MPR, et donc si l'on veut accéder à un nœud on doit connaître les MPR qui permettent de l'atteindre. L'analyse des TC permet à chaque nœud de maintenir une " base de topologie " pour chaque destination. Les messages TC sont diffusés dans tout le réseau en utilisant la diffusion optimisée d'OLSR par l'intermédiaire des relais multipoints.

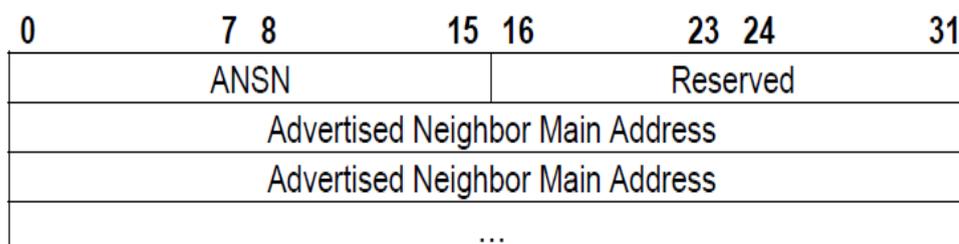


Figure 2.9: Format d'un message TC

Les champs du message Topology Control sont définis selon le RFC 3626 comme suit :

- ANSN (*Advertised Neighbor Sequence Number*) : un numéro de séquence associé avec l'ensemble des voisins avertis de ce message indiquant la fraîcheur de l'information ;

- Reserved*: Ce champs est réservé et doit etre maintenu à "0000000000000000";

- Advertised Neighbor Main Address*: Ce champ contient l'adresse du nœud voisin averti par les changements topologiques.

2.5.4 Calcul des routes

Le routage se fait saut par saut. Chaque nœud dans le réseau calcule sa table de routage pour atteindre tout autre nœud présent dans le réseau. Ce calcul est basé

sur les informations de voisinage et de topologie rafraîchies périodiquement. De ce fait, à chaque fois que l'une des adresse change, la table de routage est mise à jour et recalculée. La table de routage possède le format de la figure 2.10.

R_dest_addr	R_next_addr	R_dist	R_iface_id
-------------	-------------	--------	------------

Figure 2.10: Format de la table de routage du protocole OLSR

- R_next_addr est l'adresse identifiante du nœud à un saut à prendre pour atteindre le nœud identifié par son adresse R_dest_addr;
- R_iface est l'identifiant de l'interface locale par laquelle le nœud peut atteindre R_dest_addr;
- R_dist est la distance estimée en nombre de sauts séparant R_dest_addr du nœud local.

La table de routage est mise à jour à chaque fois que l'on détecte un changement topologique dans la base d'information topologique et plus précisément lorsque l'on détecte une disparition ou apparition d'un tuple dans la base de la topologie. Cette mise à jour n'engendre aucune génération de message dans le réseau; il s'agit d'un simple recalcul local.

2.6 Synthèse

Comme nous l'avons vu, il existe donc quatre catégories de protocoles de routage : Proactifs, Réactifs, Hybrides et Géographiques [22][33][8]s. La Figure 2.11 regroupe sous forme schématique les principaux protocoles qui ont été présentés.

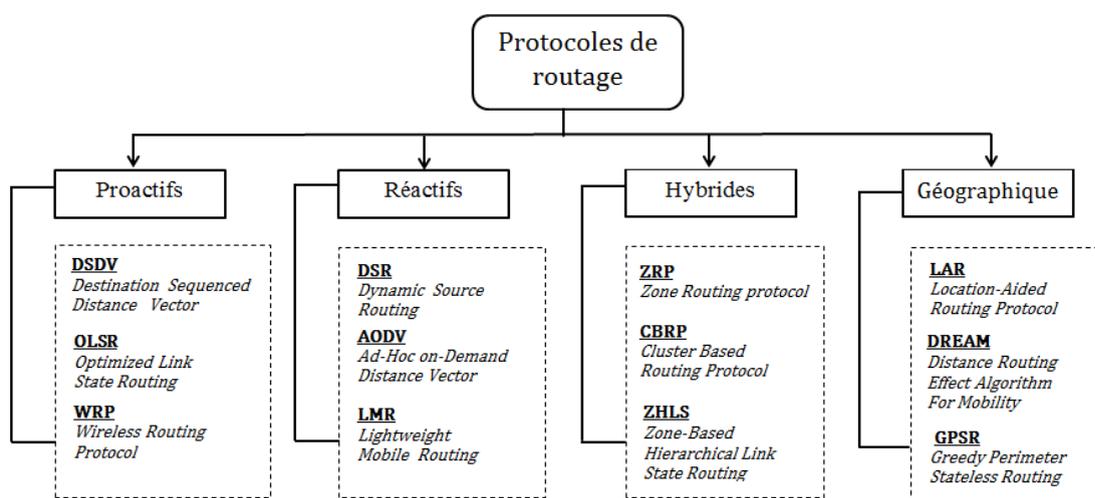


Figure 2.11: Les protocoles de routage ad hoc.

Les protocoles proactifs ont une très bonne réactivité car les nœuds possèdent en permanence, au sein des tables de routage, les routes pour atteindre tous les nœuds du réseau, mais cela se fait au détriment de la capacité d'échange du réseau, car les messages de contrôle sont nombreux et limitent donc la bande passante disponible pour les données. Ces protocoles sont donc plutôt adaptés aux réseaux de taille moyenne mais pouvant présenter une mobilité importante et nécessitant une forte réactivité.

Les protocoles réactifs, quant à eux, souffrent d'un temps de latence avant l'envoi des données car il faut établir une route entre la source et la destination. En revanche, ils utilisent peu de trafic de contrôle et, par conséquent, ils pénalisent moins la capacité d'échange du réseau. Ce type de protocoles est donc bien adapté au grand réseau mais il est pénalisé par des nœuds à forte mobilité car les routes changent en permanence, ce qui induit de fréquentes recherches de route et des temps de latence importants dans le réseau. Ces protocoles sont donc plutôt destinés à des réseaux ayant un grand nombre de nœuds mais avec une mobilité relativement faible.

Les protocoles hybrides essaient de combiner les avantages des protocoles proactifs et réactifs en introduisant de nouvelles notions dans la politique de routage comme l'éloignement relatif des nœuds et les possibilités en termes de ressource des nœuds. Mais plus la complexité du routage augmente, plus des ressources au niveau des nœuds sont mobilisées et plus des temps de retard dans l'émission des données sont introduits. Dans un réseau ad hoc, la fonctionnalité de routage pour les nœuds

est une tâche qui ne doit pas être pénalisante et qui ne doit donc pas leur nécessiter beaucoup de ressources ; il faut alors trouver un compromis entre l'optimisation de la fonction du routage, la charge de travail des nœuds pour réaliser cette fonction et la consommation énergétique et mémoire.

Les protocoles géographiques optimisent le routage en introduisant la position du nœud et éventuellement sa vitesse. Ces nouvelles données sont très pertinentes pour optimiser la recherche d'un meilleur chemin entre la source et la destination, mais ne sont pas forcément adaptées à tous les types de réseaux. En effet, ces protocoles supposent que le nœud dispose d'un moyen de connaître sa position, tel qu'un GPS, ce qui n'est pas toujours possible. En revanche, dans le cas de réseau de véhicules, ce type de protocoles semble plutôt bien adapté.

Nous constatons dans la Table 2.1 que chaque famille de protocole de routage est plus ou moins adaptée à un type de réseau. Il convient donc de définir précisément les caractéristiques du réseau (taille, mobilité des nœuds, ressources des nœuds, volume d'information à échanger, ...) afin de bien choisir un protocole de routage adapté [102].

Protocoles	Avantages	Inconvénients
Proactifs	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de temps de réaction ; - Adaptés aux réseaux denses de taille moyenne ; - Adaptés aux réseaux à forte mobilité . 	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic de contrôle important; - Capacité d'échange du réseau limitée; - Consommation énergétique plus importante.
Réactifs	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic de contrôle faible ; - Adapté aux grands réseaux ; - Consommation énergétique réduite. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de réaction long ; - Problème en cas de forte mobilité des nœuds.
Hybrides	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptables aux grands réseaux ; - Consommation énergétique réduite ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche des routes complexes ; - Temps de réaction long ; - Ressources CPU et mémoire.
Géographiques	<ul style="list-style-type: none"> - Position des nœuds connue ; - Limitation du trafic. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'un GPS ; - Ressources CPU et mémoire.

Table 2.1: Avantages et inconvénient des différentes catégories de protocoles de routage

2.7 Conclusion

Le routage est une des fonctions de base essentielles au bon fonctionnement des réseaux. Dans ce chapitre nous avons abordé le problème de routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Nous avons vu que le problème de routage est loin d'être évident dans cet environnement, qui impose de nouvelles limitations par rapport aux environnements classiques. En effet, les stratégies de routage doivent tenir compte des changements fréquents de la topologie, de la consommation de la bande passante qui est limitée, ainsi que d'autres facteurs. Nous avons présenté quelques protocoles de routage du groupe MANET en décrivant leurs principales caractéristiques et fonctionnalités.

Ensuite, nous avons détaillé le fonctionnement du protocole OLSR qui représente l'objet de notre étude. Enfin, une étude comparative a clôturé ce chapitre.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder la notion de qualité de service (QoS) dans les réseaux mobiles Ad Hoc où nous nous intéresserons particulièrement au routage avec qualité de service.

3

Qualité de Service dans les réseaux mobiles ad hoc

3.1 Introduction

Les applications qui exigent une qualité de service (QoS, *Quality of Service*) sont de plus en plus nombreuses telles que la vidéo à la demande avec des exigences de bande passante, la voix sur IP avec des exigences sur les délais de bout en bout et sur leurs variations. Le déploiement de telles applications dans les MANETs représente de nombreux intérêts. Cependant nous devons faire face à plusieurs défis et difficultés, et trouver des solutions fiables qui aident à l'intégration de la qualité de service dans ce type de réseaux.

Le groupe MANET de l'IETF (*International Engineering Task Force*) a proposé plusieurs protocoles de routage pour les réseaux mobiles ad hoc. Ceux-ci fonctionnent en mode best effort c'est-à-dire : au mieux. Cependant, ils ne permettent pas de garantir une qualité de service. Généralement, la recherche sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc touche à plusieurs domaines [67]: Les modèles de QoS, la différenciation au niveau de la couche MAC, les protocoles de signalisation et Le routage avec QoS.

Dans ce chapitre, nous présenterons un état de l'art des solutions de la QoS dans

les MANETs, nous nous intéresserons plus particulièrement au routage avec QoS. Pour ce faire nous détaillerons quelques principales notions de la qualité de service, la définition, les métriques, les solutions et le problème de routage avec QoS dans les MANETs, ainsi qu'une présentation de quelques protocoles de routage avec QoS les plus représentatifs.

3.2 Définition de la qualité de service

Le terme de la qualité de service peut regrouper une multitude de concepts distincts. Dans le domaine des réseaux et télécommunications, il désigne tout mécanisme permettant d'adapter le comportement du réseau aux besoins des applications, ou bien comme la capacité d'un élément du réseau (ex : routeur, nœud ou une application) de fournir un niveau de garantie pour un acheminement des données [10].

La qualité de service (QoS, *Quality of Service*) est définie comme "l'effet général de la performance du service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur du système" selon la recommandation E800 du CCITT (*Consultative Committee for International Telegraph and Telephon*). Il s'agit d'une définition subjective qui donne une perception de la qualité de service du point de vue d'un utilisateur.

La RFC 2386 [63] caractérise la QoS comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination. Ces besoins peuvent être traduits par un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables appelés les métriques de la QoS.

3.3 Les Métriques de la qualité de service

La qualité de service est basée en général sur un certain nombre de paramètres, de natures différentes et qui ont pour but de préciser les besoins des utilisateurs envers les fournisseurs de services [10]. Pour cela, afin de garantir la qualité de service, le réseau offre un ensemble de services préalablement déterminés et attribués aux utilisateurs satisfaisant certains critères de QoS par rapport à la connexion de bout en bout en terme de délai, de bande passante, de probabilité de perte des paquets et de gigue.

Les métriques de la QoS peuvent être principalement additives, concaves ou multiplicatives [10][59]. Le délai et la gigue sont des métriques additives où le délai (ou la gigue) de bout en bout est la somme de tous les délais (gigues) sur tous les

liens le long du chemin. La bande passante est une métrique concave dans le sens où la bande passante de bout en bout est la bande passante minimale entre tous les liens le long du chemin [59]. La disponibilité d'un lien, basée sur des critères comme la probabilité de perte du lien, est une métrique multiplicative qui représente le produit des valeurs des métriques de QoS entre tous les liens le long du chemin [10]. Dans ce qui suit, nous présenterons brièvement les quatre métriques principales de QoS.

3.3.1 La bande passante

La bande passante représente la source de transmission qu'occupe ou reçoit un flot. La gestion de la bande passante est un élément important pour la garantie de la qualité de service [64].

3.3.2 Délai de bout en bout

Le délai de bout en bout est le temps écoulé entre l'envoi d'un paquet par un émetteur et sa réception par le destinataire [27]. Le délai tient compte du [64]:

- Délai de propagation typiquement lié à la topologie du réseau, il dépend de la distance physique qui sépare la source de la destination ;
- Délai d'attente et de traitement des paquets à l'intérieur des files d'attente, déterminé par la charge du réseau, ainsi que les politiques de traitement de l'information dans les nœuds pour obtenir une fluidité maximale de l'écoulement de l'information ;
- Délai de transmission dépend de la taille des flots. Ce paramètre est lié étroitement à l'utilisation du réseau et au partage de la bande passante.

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

3.3.3 La gigue (variation du délai)

La gigue désigne la variation du délai de bout en bout au cours de la transmission. La gigue est due principalement aux délais de traitement variables dans les nœuds du réseau. Ce paramètre nuit automatiquement à la qualité de service demandée [10].

3.3.4 La perte des paquets

Ce paramètre indique le taux de suspension de la transmission des paquets erronés. Correspondant à la non délivrance d'un paquet de données, la perte de paquets se produit lorsqu'il y a des erreurs d'intégrité sur les données, la plupart du temps due à un encombrement du réseau [65].

3.4 Qualité de service dans les réseaux ad hoc

La problématique de la QoS a été largement étudiée dans le cas des réseaux filaires [10]. Dans ce type de réseaux, des équipements tels que les routeurs peuvent assurer le contrôle de la QoS. Mais dans le cas des réseaux sans fil ad hoc, la problématique est complètement différente. En effet, il n'existe aucun élément du réseau pouvant s'occuper tout seul de la QoS. Cette fonction doit donc être distribuée [22]. De plus, les conditions de transmission dans le réseau sont en constante évolution : mobilité des nœuds, médium radio peu fiable, etc. Les ressources du réseau sont également plus limitées que celles des réseaux filaires, notamment pour la bande passante, il n'est donc pas possible de satisfaire les mêmes besoins que pour les applications de réseaux filaires.

3.4.1 Le besoin en QoS des applications

Au début de l'apparition des réseaux mobiles ad hoc, l'objectif était d'assurer la communication entre les nœuds en utilisant le service " best effort ". Mais pour des applications telles que le multimédia, téléphonie, jeux interactifs, applications critiques, etc. ce service n'est pas suffisant car ces applications sont exigeantes en terme de certains critères (bande passante, délai, etc.). Suivant le type de l'application, les besoins en QoS diffèrent. Par exemple, pour les applications temps réel, comme la voix et la vidéo, le délai de bout en bout d'un paquet doit être borné, autrement le paquet est inutile. Les applications non temps réel, comme le transfert de fichiers ou la messagerie, se focalisent quant à elles sur la fiabilité des communications [10].

La figure 3.1 montre un exemple des besoins de quelques applications de la qualité de service particulièrement des deux métriques: bande passante et délai de bout en bout [64].

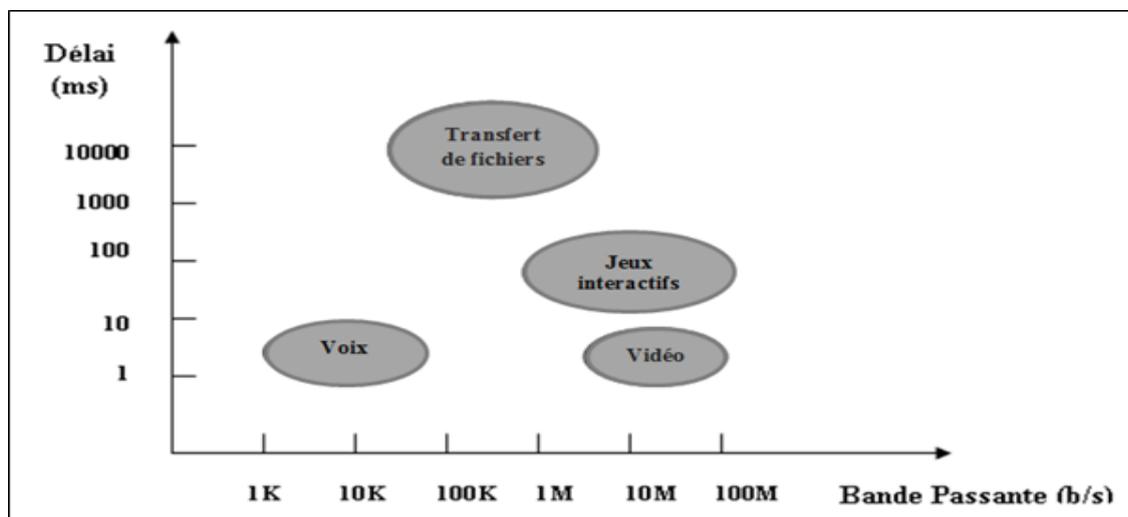


Figure 3.1: Besoin en délai et bande passante des applications.

3.4.2 Objectifs de la qualité de service

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 soient utilisées d'une façon optimale [10]. Dans le cas des réseaux ad hoc la qualité de service nous permet de :

- Offrir des traitements adaptés aux applications ;
- Avoir une administration plus fine du réseau;
- Partager les ressources d'une manière plus équitable ;
- Optimiser les coûts des réseaux.

Enfin l'objectif d'un support de QoS dans les réseaux ad hoc n'est pas d'offrir une garantie stricte de la QoS, mais plutôt de s'efforcer d'offrir une QoS proche de la QoS demandée, tout en ayant une bonne utilisation des ressources et en acceptant un nombre important de flux.

3.5 Solutions de qualité de service dans les réseaux ad hoc

Les solutions de QoS pour les réseaux mobiles ad hoc peuvent être classées en quatre catégories illustrées par la figure 3.2 [66][67]:

- **Les modèles de qualité de service:** regroupent les définitions d'architectures destinées à assurer une certaine qualité ;
- **Différentiation des services au niveau de la couche MAC :** fournissent un ensemble d'outils permettant de mettre en œuvre certaines règles de qualité de service ;
- **Les mécanismes de réservation (protocoles de signalisation):** définissent un ensemble de messages de contrôle, destinés par exemple à provoquer la réservation de ressources ;
- **Les protocoles de routage avec qualité de service :** sont chargés de la recherche de routes répondant à certains critères.

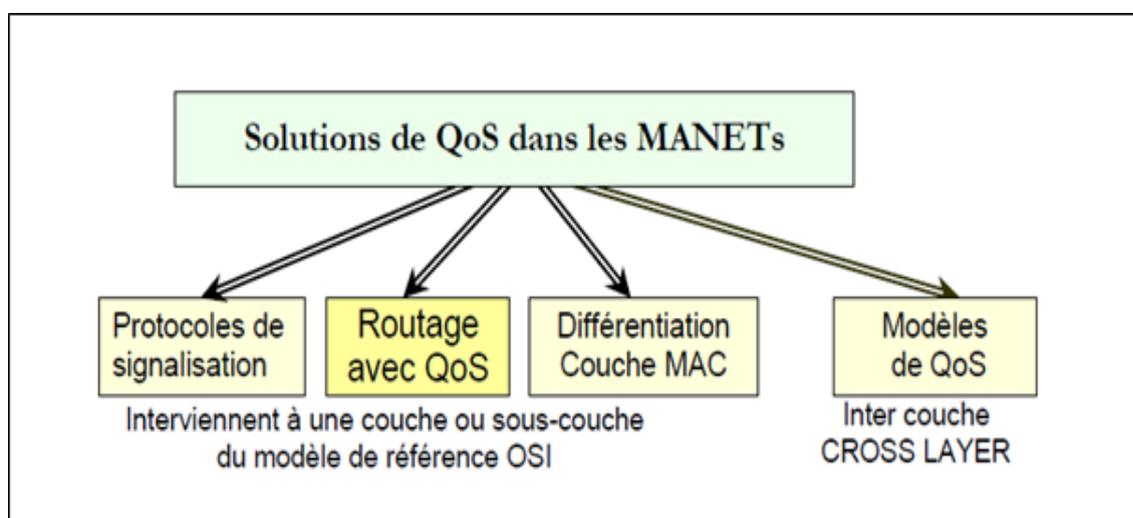


Figure 3.2: Solutions de QoS pour les réseaux ad hoc.

En réalité, ces solutions ne sont pas indépendantes. En effet, pour construire un bon modèle de qualité de service et atteindre cet objectif, les composants de QoS (routage QoS, protocole de signalisation, protocole MAC avec QoS) doivent coopérer. En outre, Un protocole MAC avec QoS est un composant essentiel de la qualité de service dans les MANET, toutes les couches supérieures (routage QoS et protocole de signalisation) dépendent de lui [68]. Dans ce qui suit, nous présenterons brièvement les différentes solutions suscitées.

3.5.1 Modèle de qualité de service

Un modèle de qualité de service définit quels types de services peuvent être fournis dans un réseau ainsi que les classes de QoS et leurs propriétés. Tout modèle

de QoS comprend au moins deux classes de trafic: celle associée aux flux QoS et celle associée aux flux BE (Best Effort) [69]:

- **Flux QoS** : est un flux ayant des exigences de QoS (bande passante, délai et gigue) ;
- **Flux BE** : est un flux n'ayant pas d'exigences particulières de QoS. Un tel flux sera traité au mieux ; traitement par défaut.

Dans le monde filaire, les modèles les plus connus sont IntServ/RSVP (*Integrated Service/ Ressource Resrvation Setup Protocol*) [70] et DiffServ (*Differentiated Services*) [71]. Ils sont proposés par l'IETF pour fournir des garanties aux besoins des services temps réel dans les réseaux filaires.

- **Le modèle d'intégration de services IntServ/RSVP**

L'architecture à intégration de services propose un ensemble d'extensions à l'architecture Internet en associant la QoS au délai de transfert de paquets et en se reposant sur deux principes : le contrôle d'admission du réseau et la réservation de ressources afin de fournir des services différenciés. Un mécanisme est utilisé pour signaler les exigences de la QoS par flux aux nœuds du réseau (hôtes, routeurs ou même sous réseaux) qui implémentent à leur tour et selon les ressources disponibles l'un des services IntServ en fonction du type de QoS souhaité. En plus d'IntServ, RSVP (Resource Reservation Setup Protocol) est un mécanisme dynamique conçu pour effectuer des réservations explicites de ressources dans une architecture IntServ. Une fois ces ressources réservées, elles sont utilisées pour un flux de données.

Or, l'application du modèle IntServ dans MANET s'avère inadaptée à l'environnement ad hoc. Ceci est justifié du fait que les capacités des nœuds mobiles sont trop variables et limitées pour supporter un traitement complexe et gérer les réservations ainsi que les états des communications en cours. De plus, une réservation dans les réseaux filaires est différente de celle d'un réseau mobile sans fil car les liens sont partagés, limités et susceptibles à des variations spatio-temporelles.

- **Le modèle de différenciation de services DiffServ**

Le modèle DiffServ [71] vise à résoudre le problème de complexité et de passage à l'échelle posée par le modèle IntServ. Il consiste, dans une situation de congestion, à reporter les pertes de paquets sur certaines classes de trafic, pour en protéger d'autres. Ainsi le passage à l'échelle est possible en offrant des services à des agrégats

plutôt qu'à des flux, tout en laissant le cœur du réseau aussi simple que possible et repoussant le traitement par flux aux extrémités du réseau.

Par ailleurs, le modèle DiffServ semble le mieux adapté aux réseaux mobiles. Ce modèle utilise une granularité par classe, où aucune signalisation pour la réservation de ressources n'est utilisée. Cependant, dans ce modèle le cœur du réseau est supposé bien dimensionné et un administrateur de domaine est nécessaire. Ces deux contraintes restent difficiles à satisfaire [10].

C'est alors que, plusieurs modèles de QoS pour les réseaux ad hoc ont été proposés tels que le modèle SWAN [74], qui est une adaptation des modèles IntServ et DiffServ, Le modèle FQMM [72] qui est un modèle hybride et d'autres comme iMAQ [75].

3.5.1.1 Le modèle FQMM

FQMM (*Flexible Quality of service Model for MANETs*) [72] repose sur une architecture plate (non hiérarchique), constituée d'une cinquantaine de nœuds mobiles. Il combine les propriétés des modèles filaires IntServ [70] et DiffServ [71] en offrant une méthode d'approvisionnement hybride: par flux, pour les trafics prioritaires et par classe, pour les autres trafics. Afin d'obtenir les deux types de granularités (par flot ou par classe) des modèles filaires, FQMM définit plusieurs classes de service dont la plus haute permet à chaque flux de spécifier les contraintes qui lui sont propres.

A l'image de DiffServ, FQMM définit trois types de nœuds : les nœuds d'entrées (émetteurs), les nœuds intermédiaires et les nœuds de sortie (récepteurs). Les nœuds d'entrées permettent de marquer et classifier les paquets, qui seront ensuite relayés par les nœuds intermédiaires suivant leurs PHB (*Per Hop Behavior*), jusqu'au nœud destinataire. Ce modèle repose essentiellement sur la couche IP, où les fonctionnalités sont séparées en deux grands plans [73] : le plan relayage de données et le plan contrôle et gestion. Compte tenu du fait que dans un réseau ad hoc, chaque nœud assure la fonction de routage et chaque mobile joue différents rôles pour différents flux, FQMM requiert l'utilisation d'un protocole de routage capable d'offrir une certaine qualité de service [68].

la figure 3.3 montre l'architecture de l'approche FQMM. L'avantage de cette dernière est la possibilité 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 [10].

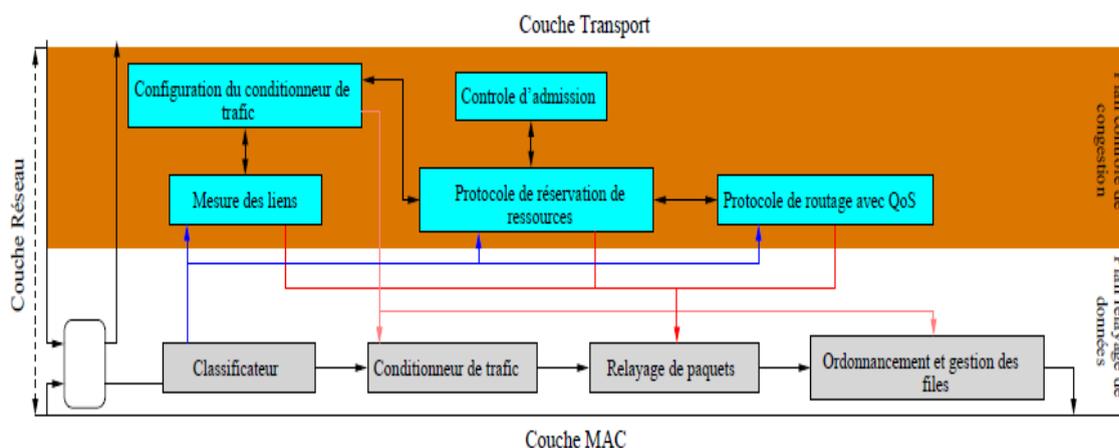


Figure 3.3: Le modèle FQMM.

3.5.1.2 Le modèle SWAN

SWAN (*Service Differentiation in Wireless Ad Hoc Networks*) [74] est une adaptation du modèle DiffServ aux réseaux mobiles ad hoc [57]. SWAN est un modèle réseau sans état basé sur des algorithmes de contrôle distribués dans le but est d'assurer une différenciation de services dans les MANETs.

Ce modèle offre la priorité (au niveau paquet) aux trafics temps réel en contrôlant la quantité de trafics best effort acceptée par un nœud mobile. Lorsqu'un nouveau flux QoS est introduit, la source se charge du contrôle d'admission: elle envoie une sonde, qui à son retour contient la bande passante minimale pouvant être offerte aux flux sur la route choisie. Selon la valeur obtenue, la source décide d'accepter ou de rejeter le flux [15].

Un aspect important de ce modèle de qualité de service qui permet de réguler le débit des trafics best-effort en utilisant comme paramètre des mesures de délai au niveau MAC, dans le but de maintenir la qualité de service des trafics déjà acceptés. Dans le cas d'une congestion et afin de permettre à la source de réinitialiser le contrôle d'admission, un bit de l'entête IP appelé ECN (*Explicit Congestion Notification*) est utilisé (voir figure 3.4). Cependant, si la route ne dispose pas d'assez de bande passante le trafic est supprimé. Ainsi, SWAN permet de fournir une QoS logiciel (*soft QoS*). En outre, dans cette approche, le protocole de routage ainsi que la couche d'accès au médium sont de type best effort [10].

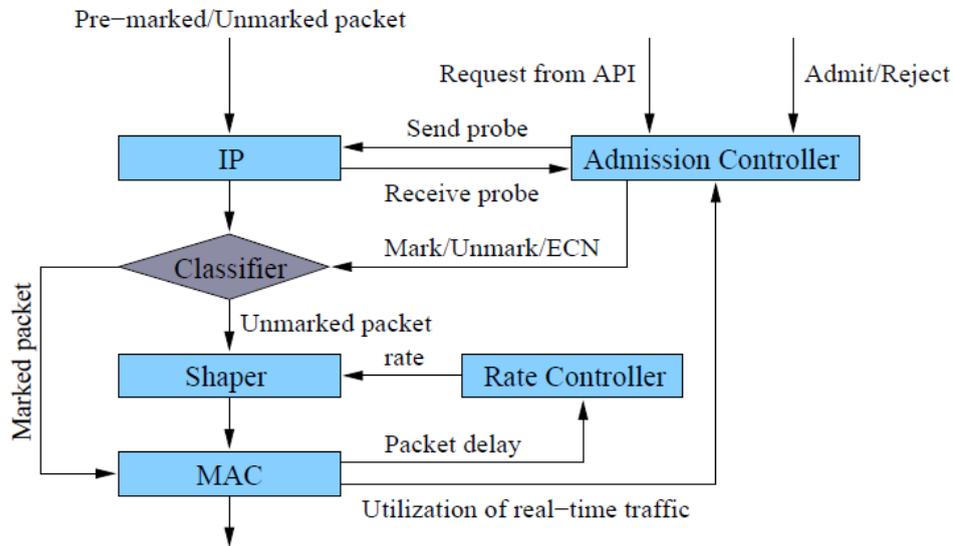


Figure 3.4: Le modèle SWAN.

3.5.1.3 Le Modèle iMAQ

Le modèle iMAQ (*Integrated Mobile Ad hoc Qos framework*) [75] fournit le support des transmissions des données multimédia dans un MANET. Le 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 QoS aux trafics multimédia. Le protocole de routage est basé sur la prédiction de la position des nœuds (*prédictive location-based*) et orienté QoS. La couche Middleware communique également avec la couche application et la couche réseau (voir figure 3.5) et essaye de prévoir le partitionnement du réseau. Pour fournir une meilleure accessibilité aux données, il réplique les données entre les différents groupes du réseau avant d'effectuer le partitionnement.

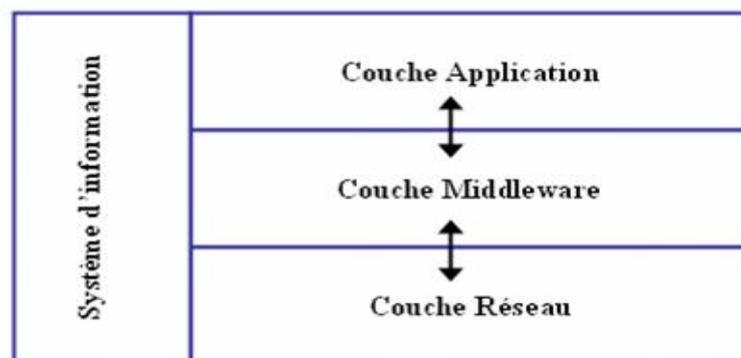


Figure 3.5: Le modèle iMAQ.

3.5.2 La couche MAC avec qualité de service

Les spécificités du médium radio rendent l'utilisation d'un protocole d'accès au médium efficace primordial. Le rôle du protocole d'accès au médium est multiple. Il permet d'éviter les collisions, d'assurer le partage de la bande passante et de résoudre certains problèmes spécifiques aux transmissions hertziennes (stations cachées ou exposées). Cependant, beaucoup de protocoles de routage avec qualité de service pour les réseaux ad hoc pourraient tirer parti des protocoles de la couche liaison capables de gérer une certaine qualité de service [68]. Pour cela, un protocole MAC avec QoS est requis pour obtenir les meilleures performances du support de QoS. Des schémas de différenciation de service au niveau MAC ont été proposés.

3.5.2.1 Différenciation de services pour 802.11

Le principe est de doter le protocole IEEE 802.11 d'un mécanisme de priorités entre les trames afin de concevoir des mécanismes de différenciation de services efficaces. Pour ce faire, les auteurs de [76] proposent d'adapter certains paramètres de la fonction de coordination distribuée (DCF) du protocole 802.11 selon les priorités des paquets. Ces paramètres peuvent être adaptés dynamiquement afin d'offrir un mécanisme de priorités au protocole 802.11:

- Lorsqu'une collision survient, les délais avant retransmission sont allongés aléatoirement. Il est possible d'incrémenter ces délais différemment selon le niveau de priorité ;

- Il est possible d'utiliser différentes valeurs du délai de silence avant une transmission (DIFS) selon le niveau de priorité de la transmission ;

- Enfin, il est possible de limiter la longueur des trames selon le niveau de priorité, les trames peu prioritaires occupant le canal moins longtemps [68].

Les trois principes ont été testés sur des flots UDP et TCP. De ces trois méthodes, la deuxième, consistant à jouer sur le délai DIFS, semble la plus stable et la plus performante.

3.5.2.2 MACA/PR

Le protocole MACA/PR (*Multiple Access Collision Avoidance with Piggyback Reservation*) [77] propose de différencier la politique d'accès au médium selon la nature des flux. Les paquets des flux non privilégiés sont traités de façon standard. Pour les flux temps réel, une unique demande d'autorisation à transmettre (échange RTS-CTS) est effectuée en début de flux. Tous les paquets suivants sont transmis

directement et doivent être acquittés par le récepteur. Dès qu'un paquet n'est pas acquitté, une nouvelle demande d'autorisation est émise.

Afin de traiter les réservations de bande passante, l'émetteur inclut des informations dans chaque paquet sur l'ordonnancement du paquet suivant. Tous les voisins du nœud récepteur, en écoutant l'acquiescement d'un paquet de données possèdent des informations sur la date d'arrivée du prochain paquet et peuvent différer leurs transmissions.

3.5.2.3 IEEE 802.11e

La spécification du draft IEEE 802.11e [78] propose le support de la QoS dans les réseaux sans fil avec une nouvelle fonction de contrôle EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), considérée comme la nouvelle version de la fonction DCF, et une fonction de coordination hybride (HCF).

EDCA introduit quatre catégories de trafics (TC). Les priorités sont contrôlées par les stations en modifiant le schéma d'accès de base (DCF). Plus flexible que la fonction PCF, HCF est utilisée par les points d'accès pendant la période d'accès contrôlée (CAP), qui peut commencer à n'importe quel moment durant 'la super-frame'. Autrement dit, ça lui permet d'avoir accès au médium pour faire passer un trafic ayant des contraintes de QoS [10].

3.5.3 Protocoles de signalisation

La signalisation est un élément essentiel de la qualité de service dans les réseaux. Elle permet de réserver et de mettre à jour les ressources, d'initialiser et d'arrêter le trafic ainsi que de renégocier le profil du trafic. Elle peut s'effectuer à l'intérieur des paquets de données (signalisation in band) ou grâce à des paquets explicites de contrôle (signalisation out band) [20]. Concevoir un protocole de signalisation consiste à définir les données à échanger afin de réaliser une tâche particulière ainsi que la manière de les échanger [32].

Le but des protocoles de signalisation est de fournir un moyen de propager des informations de contrôle à travers un réseau. Les informations transmises peuvent être de différentes natures. Il peut s'agir d'informations topologiques, de demandes de recherche de routes satisfaisant certaines contraintes ou encore de rapports sur l'état du réseau et la disponibilité des ressources.

Le premier protocole de signalisation utilisé dans les réseaux mobiles ad hoc est INSIGNIA [80] qui est aussi un modèle de QoS. D'autres protocoles ont été définis

comme Dynamic QoS/dRSVP [81].

3.5.3.1 INSIGNIA

INSIGNIA [80] est un protocole de signalisation spécialement conçu pour les réseaux ad hoc (voir Figure 3.6). Il établit 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 messages de contrôle sont encapsulés comme une option dans les paquets de données IP. Ceci permet de réduire l'overhead généré par les messages de signalisation et ce afin d'éviter de surcharger le réseau ; contrairement à une signalisation "out-band" explicite. INSIGNIA supporte deux types de services (temps réel et best effort). Il offre des algorithmes de réservation, restauration et d'adaptation rapides pour répondre aux changements de topologie du réseau et aux dégradations des liens sans fil .

Ce protocole offre des garanties sur la base d'une granularité par flot aux applications adaptatives capables de modifier leur comportement en fonction de la quantité de bande passante qui leur est allouée. Ainsi, chaque application spécifie deux niveaux de qualités de service [10] :

- Le niveau de base (TR: Temps Réel) : Permet de spécifier la bande passante minimale nécessaire au trafic c'est le niveau dégradé.
- Le niveau amélioré (BE : Best Effort) : Permet de spécifier le débit optimal à atteindre lorsque les ressources sont disponibles.

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. Le destinataire informe périodiquement la source de l'état de la route en envoyant des rapports de QoS (*QoS Reporting*), qui contiennent des statistiques sur la latence, le taux de perte et le débit. Ces informations peuvent donc servir pour la source à réguler son débit d'émission. Dans un cadre général, et dans le but de fournir des services temps réel adaptatifs, les auteurs de [80] propose un modèle de gestion de flots (*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.

L'un des inconvénients d'une telle approche est le fait d'avoir des informations sur les trafics dans chaque nœud ce qui pose des problèmes de capacité des nœuds,

et la difficulté de passage à l'échelle avec l'augmentation du nombre de flux. En outre, cette approche n'offre que deux types de service temps réel et best effort. Finalement, INSIGNIA ne supporte que les applications multimédia adaptatives, et la réservation de ressource ne peut être établie que lorsque le trafic est lancé [10].

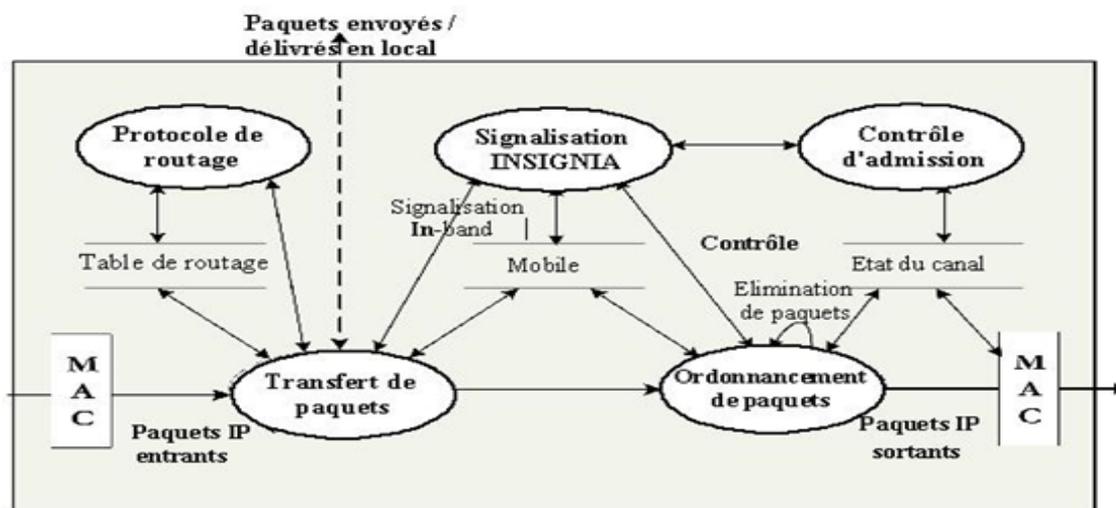


Figure 3.6: Architecture INSIGNIA.

3.5.3.2 Dynamic QoS / dRSVP

Dans les protocoles usuels, les applications demandent une quantité précise de bande passante. Très souvent, le même niveau de service est conservé durant toute la transmission. Les auteurs de Dynamic QoS [81] remettent en cause cet aspect statique de la réservation de bande passante. Lors de la demande de réservation, les applications ne spécifient pas une valeur précise mais un intervalle de valeurs. La borne inférieure représente le débit nécessaire au fonctionnement de l'application et la borne supérieure le débit maximal qui pourra être atteint.

Lors de la confirmation de réservation, le réseau indique à l'émetteur la quantité de bande passante qui lui a été effectivement allouée. D'autre part, on considère souvent qu'un lien a une capacité fixe, mais sur le canal qu'est l'air, cette capacité est variable. Dans Dynamic QoS, la quantité de bande passante réservée par les applications peut être modifiée en cours de transmission, soit à l'initiative du réseau dans le cas où les ressources deviennent rares ou se libèrent, soit à l'initiative de l'application émettrice elle-même afin de libérer des ressources dans le réseau. Si cette approche est originale et peut permettre de diminuer la probabilité de rejet des demandes de réservation, elle nécessite un accord entre les différents émetteurs

s'il n'y a pas d'administration centralisée. Elle pourrait être très efficace dans des réseaux avec points d'accès.

3.5.4 Routage avec qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc

Le routage dit au mieux (*best effort*) consiste à trouver le chemin le plus court entre une source et une destination en termes de distance. Cependant le routage avec QoS (*QoS Routing*) peut être défini comme le mécanisme par lequel les chemins associés aux flux sont déterminés à la fois par la connaissance des ressources disponibles et par les demandes en termes de QoS de ces flux. Pour le routage avec QoS, on ajoute un certain nombre de contraintes (délai, bande passante, fiabilité,...etc) sur les routes afin de déterminer leur éligibilité. En effet, toute route satisfaisant un certain critère quantitatif ou qualitatif peut être qualifiée de route assurant une certaine qualité de service. Par conséquent, les protocoles de routage pour les réseaux ad hoc doivent être adaptatifs aux changements dus à la mobilité des nœuds [15].

3.5.4.1 Objectifs du routage avec qualité de service

Le routage avec QoS cherche à atteindre les trois objectifs suivants [9]:

- Détermination dynamique de chemins possibles: le routage QoS peut déterminer parmi de nombreux choix, un chemin répondant aux exigences de QoS et qui est réalisable de bout en bout ;
- Optimisation de l'utilisation des ressources: le routage QoS peut aider dans l'utilisation efficace des ressources en améliorant la capacité totale du réseau ;
- Permettre une dégradation gracieuse des performances du réseau.

3.5.4.2 Difficulté de routage avec qualité de service

Dans le cas du routage avec qualité de service, le but n'est pas simplement de trouver le meilleur chemin selon un certain critère mais de trouver le meilleur chemin admissible. On ajoute un certain nombre de contraintes sur les routes afin de déterminer leur éligibilité. Par exemple, on peut vouloir rechercher une route disposant d'une certaine quantité de bande passante pour un trafic vidéo. Toute route satisfaisant un certain critère quantitatif peut être qualifiée de route assurant une certaine qualité de service [68].

Si l'on peut considérer que cet objectif sera bientôt atteint dans les réseaux locaux filaires, les réseaux ad hoc présentent un grand nombre de spécificités qui rendent la conception d'un tel algorithme de routage avec QoS très difficile.

Les réseaux ad hoc sont avant tout des réseaux radio où la propagation radio dans l'air est soumise à des contraintes spécifiques. Les ondes radio sont extrêmement sensibles à leur environnement. Le multi-hop exigé par l'absence d'une administration de base implique une gestion distribuée de la fonction du routage et l'ajout d'une métrique de la qualité de service rend le mécanisme d'établissement des routes plus compliqué. Enfin les changements de topologie dans les réseaux ad hoc exigent de recalculer les routes avec QoS, et répondre assez rapidement sans dégrader leur niveau de QoS. Par conséquent, des ressources additionnelles sont consommées (bande passante, batterie, etc.) [18].

3.5.4.3 Protocoles de routage avec qualité de service

Plusieurs protocoles de routage avec QoS ont été proposés par la communauté scientifique pour les MANETs faisant face aux contraintes spécifiques de ces réseaux. Ces protocoles se distinguent par plusieurs critères ; selon les métriques de QoS intégrées, la plupart sont des extensions des protocoles best effort existants. Dans ce qui suit nous allons décrire quelques protocoles de routage avec QoS des plus représentatifs avec les différentes caractéristiques et techniques pour fournir la qualité de service [79].

- **Le protocole DSDV+**

DSDV+ (*Destination Sequenced Distance-Vector*) [44] ou vecteur de distance à destination dynamique séquencée est un protocole de routage proactif implémenté avec qualité de service. En effet, Lors d'une demande de réservation, DSDV évalue la quantité de bande passante disponible sur la route principale, tout en évaluant le nombre d'unités TDMA (Division du temps en unités) appelées slots, disponibles sur chaque lien tout au long de la route. Il est nécessaire de ne pas utiliser les mêmes unités pour les transmissions entre deux liens adjacents. Dès que le destinataire reçoit la demande de route, il renvoie à l'émetteur une confirmation indiquant la politique d'allocation des unités choisies sur la route empruntée, la réservation de ressources se fait parallèlement à cette réponse.

Pour pallier aux problèmes liés à la mobilité, une route secondaire non optimale en terme de nombre de sauts est maintenue. Bien que ce protocole évalue bien la bande passante disponible sur un chemin et offre le calcul de la probabilité

de rejet des appels lors des simulations, il est incapable de résoudre les problèmes d'interférences, en particulier lorsque deux nœuds utilisant les mêmes unités TDMA se rapprochent et arrivent à portée d'émission l'un de l'autre.

- **le protocole TBR**

TBR *Ticket-Based QoS Routing* est un protocole de routage qui permet de réduire la quantité des messages de routage diffusée pour la découverte de la route [68]. Ce protocole de routage QoS a été conçu pour des réseaux à faible mobilité. Le but de Ticket Based Probing est de limiter ce surcoût et de fournir des garanties de qualité de service. La découverte de route est limitée, car l'émetteur va associer une demande de route à un certain nombre de tickets logiques qui va limiter la diffusion des requêtes.

Chaque message de découverte 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.

Par conséquent, chaque nœud aura la connaissance des caractéristiques des liens vers ses voisins immédiats grâce à la transmission périodique de paquets de signalisation. Il peut donc ainsi sélectionner efficacement les voisins à qui transmettre les demandes de route. Plus un flux de données aura de contraintes, plus on associera de tickets à la demande correspondante, le nombre de tickets généré est fonction de la précision des informations d'états disponibles à la source et les besoins de QoS de la communication.

- **le protocole CEDAR**

CEDAR (*Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing Algorithm*) [42] est un protocole de routage réactif qui semble bien réagir face au dynamisme des MANETs et fournir une qualité de service en terme de bande passante. CEDAR est basé sur une élection dynamique d'un cœur de réseau stable. Des informations sur les liens stables disposant d'une grande bande passante sont propagées entre les nœuds du cœur. CEDAR est utilisé dans des réseaux de petite taille, il est basé sur trois composantes essentielles :

- **Extraction d'un cœur du réseau** : un ensemble de nœud est dynamiquement choisi pour calculer les routes et maintenir l'état des liens du réseau.

- **Propagation d'état de lien** : le routage avec qualité de service est réalisé grâce à la propagation des informations sur les liens stables avec une grande bande passante.

- **Calcul de route** : celui-ci est basé sur la découverte et l'établissement d'un plus court chemin vers la destination satisfaisant la bande passante demandée. Des routes de "secours" sont utilisées lors de la reconstruction de la route principale, quand cette dernière est perdue. La reconstruction peut être locale, ou à l'initiative de la source. Au lieu de calculer une route avec un minimum de sauts.

L'objectif principal de CEDAR est de trouver un chemin stable pour garantir plus de bande passante.

- **le protocole BRuiT**

Le principe de BRuiT (*Bandwidth Reservation under InTerferences influence*) est d'essayer d'apporter la QoS dans les réseaux ad hoc en limitant l'impact des interférences sur les communications entre les nœuds. Ce n'est pas un protocole de routage proprement parlé, mais plutôt un protocole de réservation de bande passante s'appuyant sur un protocole de routage réactif basique. Son fonctionnement s'appuie sur deux phases :

La phase de "découverte des voisins" qui leur permet de s'échanger leur état de charge respectif (e.g. la valeur totale de leur bande passante déjà réservée). Cette phase permet à chaque nœud de disposer de l'état de charge de son environnement radio. la phase de "réservation de ressources" qui est effectuée par l'ouverture d'une route sur laquelle les ressources nécessaires au flux seront réservées. Au niveau de chaque nœud, le contrôle d'admission va se faire en fonction de la bande passante disponible et de la charge du medium radio [68].

- **le protocole QOLSR**

QOLSR [79] est un protocole de routage proactif basé sur le protocole OLSR. Ce dernier propose d'avoir des messages de contrôle réduit et de minimiser l'inondation du trafic de contrôle, par l'utilisation du concept des Relais Multipoints (MPR). Pour offrir la QoS, QOLSR ajoute des extensions aux messages de contrôle durant la découverte des voisins. Il est alors pertinent d'intégrer des paramètres tels que le délai, la bande passante, le coût du lien et la perte de paquet. Les messages de contrôle TC (diffusés par les MPRs pour annoncer l'ensemble des nœuds qu'il peut atteindre) intègrent des informations de métriques additives. Une route avec

un délai minimum peut être trouvée en utilisant l'algorithme Dijkstra. Si on veut inclure la métrique de bande passante, alors s'il n'existe plus d'une route avec la Bande Passante maximale, la route avec le délai minimal sera choisie. Une étude détaillée du protocole OLSR et ses extensions sera faite dans le chapitre suivant car il représente le noyau de notre proposition.

3.6 Conclusion

Avec les avantages qu'offrent un MANET par rapport à d'autres types de réseaux, le déploiement de nouvelles applications dans ces réseaux représente plusieurs intérêts. Pour certaines applications, telles que le multimédia, l'introduction de la QoS dans les MANETs s'avère plus que nécessaire. Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature pour atteindre cet objectif. Selon le cas, ces solutions peuvent toucher une ou plusieurs couches du réseau et la solution qui touche plus de niveaux est la solution la plus efficace.

Dans notre étude nous nous intéresserons plus particulièrement à la couche réseau, en essayant d'établir un routage efficace en terme de certains critères de la QoS. Ce présent chapitre discute le concept de QoS dans les MANETs et plus particulièrement le routage avec QoS ainsi que les problèmes rencontrés dans le contexte ad hoc. Dans le chapitre suivant, nous allons détailler notre proposition qui se résume en un protocole de routage avec QoS ; il s'agit d'une extension du protocole OLSR classique qui permet de le rendre sensible à deux métriques de QoS à savoir la bande passante et le délai.

4

QS-OLSR: Une version d'OLSR avec Qualité de Service

4.1 Introduction

Compte tenu de la nature des réseaux mobiles ad hoc, il est très difficile de garantir une quelconque qualité de service à une application temps réel dans ce type de réseaux. Cependant, la prise en charge de la qualité de service dans ces réseaux est importante car elle permet d'améliorer le rendement du réseau, en offrant la possibilité à l'information de circuler facilement [22]. Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux mobiles ad hoc afin d'apporter la qualité de service [79].

Dans ce chapitre nous proposons une solution qui permet d'étendre le protocole OLSR afin de garantir la qualité de service en terme de bande passante et de délai. Pour ce faire, nous avons commencé par justifier le choix du protocole ainsi qu'une présentation de la version d'OLSR natif et de ses versions implémentant la QoS. Par la suite nous détaillons notre solution tout en expliquant les modifications nécessaires à apporter à la structure d' OLSR. Nous décrivons le nouveau mécanisme de fonctionnement basé sur la recherche de routes assurant les métriques de bande passante et de délai.

4.2 Raisons de choix du protocole OLSR

Notre choix s'est porté sur OLSR vu l'ensemble des avantages qu'il peut offrir en tant que protocole de routage proactif dans les réseaux mobiles ad hoc. Il intègre des idées d'optimisation qui ont été reprises par d'autres protocoles [34] et qui permettant de minimiser l'inondation du trafic de contrôle. Il hérite des avantages des algorithmes d'état de lien et dispose de toute l'information de routage pour tous les participants du réseau.

Le protocole OLSR est devenu très connu et a fait l'objet d'un grand nombre de recherches. Il est le résultat de six années de travail d'HIPERCOM, équipe de recherche de l'INRIA, qui a été retenu par l'IETF comme un RFC [34]. OLSR est un protocole de type état de lien optimisé où chaque nœud diffuse son voisinage dans le réseau. OLSR, tout à fait adapté aux réseaux ad hoc, peut contrôler les liens entre les équipements par des paquets spéciaux, les "Hello", et il optimise la diffusion. Cette optimisation qui s'appuie sur le concept de relais multipoints (MPR *Multipoint Relay*), économise une grande partie de la bande passante du réseau, ce qui est très important dans des réseaux denses. OLSR présente aussi l'avantage de s'adapter parfaitement aux protocoles de l'Internet et il permet à chaque équipement de connaître la topologie du réseau à tout instant.

4.3 OLSR: QoS implicite

Tel que décrit dans le RFC [34], le protocole OLSR n'utilise aucun paramètre de QoS explicitement et il n'offre aucune garantie pour les flux QoS. C'est un protocole pour les flux best effort sur la base d'une seule métrique : le nombre de sauts. Mais en analysant le fonctionnement du protocole OLSR, nous remarquons que la QoS n'est pas réellement ignorée. En effet, OLSR a mis en œuvre trois techniques [83]:

- **Utilisation des MPRs**

C'est le concept clé utilisé dans le protocole OLSR qui vise à réduire le nombre de retransmissions inutiles lors de la diffusion généralisée d'un message. Elle permet ainsi d'économiser la bande passante et les autres métriques corrélées ;

- **Utilisation des plus courts chemins**

Ce protocole offre des routes optimales (plus court chemin) en terme de nombre de sauts. Il consomme moins de bande passante et minimise les interférences inter et intra-flux ;

- **Utilisation des mécanismes de contrôle de la qualité des liens**

Ces mécanismes sont utilisés afin d'éviter, d'une part, l'utilisation des liens fragiles et instables qui entraînent des pertes de paquets de données et, d'autre part les changements fréquents de routes.

4.4 Le protocole QOLSR

Le protocole QOLSR (*QoS for OLSR*) [79] est une extension du protocole de routage OLSR pour offrir la QoS dans les réseaux MANETs. Il est capable de trouver pour chaque type d'application une route optimale satisfaisant ses contraintes exigées. Des champs additionnels pour la QoS sont rajoutés aux messages de contrôle (Hello et TC) déjà existants dans le protocole de base OLSR, durant la découverte des voisins.

Le protocole QOLSR est proactif, et donc les nœuds dans le réseau doivent maintenir une carte topologique à jour avec les informations de QoS les plus récentes. Le maintien d'une carte topologique permet le calcul rapide et immédiat d'une route pour chaque flux. Chaque nœud mesure les métriques de QoS sur les liens vers chacun de ses voisins comme la bande passante disponible, le délai, la probabilité de perte, etc. Ces informations seront enregistrées dans la table de voisinage pour calculer la liste des MPRs. Chaque nœud MPR diffuse la topologie de son voisinage avec les paramètres de QoS dans le réseau entier et seuls ces nœuds ont le droit de retransmettre la topologie locale.

QOLSR considère la bande passante et le délai comme des métriques obligatoires et les autres métriques comme optionnelles. Les Messages TC permettent à chaque nœud d'apprendre la topologie du réseau. Cette topologie est partielle puisqu'un message TC ne diffuse que les liens reliant un MPR avec ses sélecteurs. Par conséquent, un nœud lointain n'aura aucune information sur les liens entre les nœuds non MPR même si les diffusions des TC sont fiables (sans perte). La figure 4.1 montre la topologie entière du réseau et la topologie partielle diffusée par QOLSR obtenue par le nœud 1.

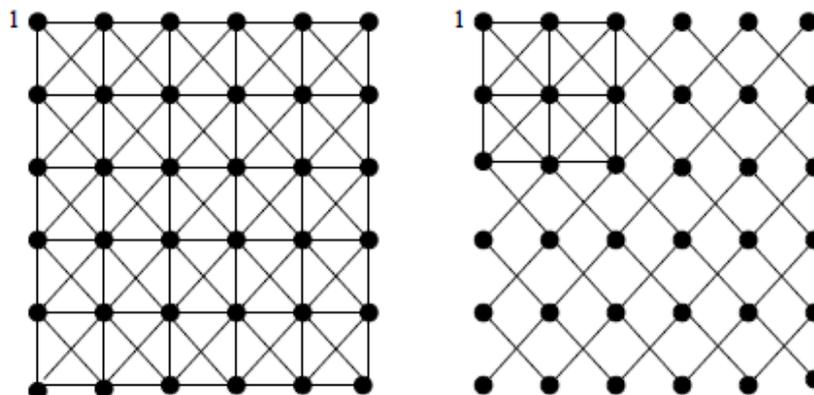


Figure 4.1: Topologie entière et topologie partielle.

4.4.1 Principe de fonctionnement de QOLSR

QOLSR est un protocole à état de lien optimisé; il obtient des routes optimales selon les contraintes exigées par les flux. Les nœuds ne déclarent qu'une sous-partie de leur voisinage avec leurs paramètres QoS grâce à la technique des relais multipoints. Malgré une connaissance pareille de la topologie de réseau, la source trouve toujours des routes qui ont les mêmes performances que celles dans le réseau entier. Ceci est assuré par une nouvelle heuristique pour le calcul des MPRs. QOLSR est composé de plusieurs fonctions qui assurent la tâche de routage avec QoS [83]:

4.4.1.1 Détection de voisinage

Chaque nœud diffuse un message *Hello* pour détecter ses voisins ayant un lien direct et symétrique avec lui. Ce message contient les informations relatives aux voisins entendus par ce nœud.

4.4.1.2 Mesure des métriques

Chaque nœud doit estimer les paramètres de QoS sur les liens vers chacun de ses voisins. Ensuite, ces informations de QoS sont transmises localement en utilisant les champs de QoS des messages Hello (voir section 4.5.6.1 schéma pour les messages Hello). Par conséquent, chaque nœud aura une carte topologique pondérée à deux sauts avec des paramètres de QoS sur les liens.

4.4.1.3 Sélection des relais multipoint

Chaque nœud sélectionne indépendamment sa liste des relais multipoints (MPRs). Contrairement aux MPRs classiques calculés dans OLSR, les MPRs d'un nœud dans QOLSR sont calculés pour contenir un sous-ensemble de ses voisins à un saut qui offrent une bande passante maximale et un délai minimum aux voisins à deux sauts. Les nœuds sélectionnés comme MPRs sont ensuite déclarés dans les messages Hello pour atteindre les MPRs eux mêmes.

4.4.1.4 Déclaration des MPRs sélecteurs et les métriques

Chaque nœud sélectionné comme MPR dans le réseau diffuse périodiquement à tous les nœuds du réseau des extensions des messages de topologie (TC) avec une fréquence déterminée par l'intervalle TC-Interval. Un message TC généré par un nœud MPR "S" contient les nœuds ayant sélectionné le nœud "S" comme relais multipoint ainsi les valeurs des métriques sur les liens. Par ailleurs, un nœud MPR peut envoyer des messages TC supplémentaires pour réagir plus rapidement aux changements de topologie et des informations de QoS. Uniquement les nœuds MPRs ont le droit de rediffuser les TC. La réception de ces messages, permet à chaque nœud dans le réseau de maintenir une base contenant les informations topologiques du réseau qui donne une vision globale (mais non pas entière) de la topologie du réseau et par conséquent les conditions de QoS.

4.4.1.5 Calcul des routes

Chaque nœud dans le réseau calcule sa table de routage en se basant sur les informations de voisinage et de topologie rafraîchies périodiquement. La table de routage est mise à jour selon les exigences d'une application ou de l'utilisateur. Pour satisfaire les contraintes de QoS demandées par un flux QoS.

4.4.2 Synthèse des solutions existantes

Les travaux publiés concernant le routage avec qualité de service reposent beaucoup sur les protocoles de routage du groupe MANET. Un certain nombre de recherches ont été menées dans le domaine du routage avec qualité de service dédié au protocole OLSR. Nous distinguons deux catégories d'approches: les approches basées sur une seule métrique et les approches multi-métriques.

4.4.2.1 Approches basées sur une seule métrique

Ying et al [82] ont proposé des améliorations qui permettent au protocole OLSR de trouver le chemin de bande passante maximum. Ils se sont basés uniquement sur la bande passante comme contrainte de la qualité de service de routage et ont révisé l'algorithme de la sélection des MPR. Le concept clé de la version révisée de l'algorithme est que le lien, offrant une bande passante élevée, ne devrait jamais être omis.

Dans [84], Une extension du protocole OLSR a été réalisée en conciliant le support de la qualité de service et l'optimisation des diffusions, la métrique de bande passante a été prise en compte afin de construire deux types de MPRs à savoir : MPRF sélectionnés selon la méthode classique utilisée par l'ancêtre OLSR et MPRB sélectionnés selon la bande passante. Son avantage est la limitation des inondations et la connaissance de la topologie du réseau alors que son inconvénient est le coût de calcul qui est très grand .

4.4.2.2 Approches multi-métriques

Le groupe de recherche à l'INRIA [83] propose un schéma de qualité de service pour le protocole OLSR. Leur technique prend en compte deux métriques, le délai et la bande passante pour le calcul de la table de routage. Ces paramètres sont inclus sur chaque table de routage d'entrée correspondante à chaque destination, et cela en procédant d'abord au calcul du plus large chemin en terme de bande passante afin de construire le shortest-widest-chemin qui est le plus court chemin en délai entre les chemins les plus larges.

Dans [87] les auteurs ont présentés une version du protocole OLSR avec qualité de service qui est basée sur deux types de paramètres : la bande passante et le délai. D'autres mesures peuvent être aussi appliqués pour assurer la qualité de service, comme la gigue, mesures de perte de paquets ou le nombre de tampons disponibles à chaque nœud le long d'un chemin. L'idée de base de cette proposition est qu'un lien direct peut ne pas être optimal en terme de QoS (bande passante ou délai). Cette solution permet à un nœud source de choisir un chemin K-sauts ($K \geq 2$) pour atteindre son voisin direct si ce chemin offre une meilleure QoS.

Dans [36], une version du protocole OLSR pour la qualité de service (QOLSR) a été réalisée qui prend en compte une métriques composite de quatre paramètres à

savoir: Le débit, le délai, la probabilité de réception et le Willingness afin d'aboutir à une fonction "score" qui sera utilisé pour la sélection des MPRs en s'appuyant sur l'algorithme de correction de marquage [96].

4.5 Présentation de la solution proposée : QS-OLSR

4.5.1 Motivation

Le routage est le mécanisme par lequel des routes sont sélectionnées dans un réseau pour acheminer les données d'une source jusqu'à une ou plusieurs destinations. Le groupe MANET de l'IETF a mis en avant les principales problématiques à traiter, et à donner des directives pour concevoir et évaluer des protocoles de routage adaptés aux réseaux mobiles ad hoc. Parmi les nombreux protocoles de routage proposés, l'IETF n'en a standardisé que cinq comme RFC, à savoir DSR [62], AODV [58], OLSR [34], TBRPF [97] et OSPF_OR [98].

Dans les réseaux mobiles ad hoc, les travaux portant sur le problème de routage au mieux ont essentiellement pris le dessus, toutefois, de nombreux paramètres importants tels que la bande passante, la durée de vie, la gigue, l'énergie, etc, ne sont pas considérés en même temps dans le routage. Des recherches sont menées activement pour offrir un support de la qualité de service dans les réseaux ad hoc et ainsi permettre un déploiement adéquat d'applications multimédia.

Pour cette raison, nous avons proposé une version du protocole OLSR prenant en compte le critère de la qualité de service et baptisée QS-OLSR. Pour cela, nous avons utilisé la bande passante et le délai comme paramètres de qualité de service.

4.5.2 Hypothèses

Le protocole proposé pour le problème de routage avec qualité de service, repose sur les hypothèses suivantes :

- Tous les nœuds du réseau mettent en œuvre le même protocole de routage avec qualité de service;
- Les critères de qualité de service à prendre en compte lors de la sélection des MPR correspondent aux mêmes métriques de QoS pour tous les nœuds du réseau;
- Tous les nœuds sont identiques (les mêmes pouvoirs) mais ils fonctionnent de manière indépendante;
- Tous les nœuds sont coopératifs et disposant d'horloges synchronisées;

Suivant la logique en couches du modèle OSI, nous adoptons une abstraction du MANET du point de vue de la couche réseau (Niveau 3 du modèle OSI).

4.5.3 Notations

Afin de faciliter la présentation de la solution proposée pour la selection des MPRs, nous adaptons la représentation du réseau par un graphe $G(V, E)$ où V est l'ensemble des nœuds mobiles dans le réseau et E est l'ensemble de ses liens. Dans ce qui suit nous utilisons la terminologie suivante :

- $(x,y) \in V^2$: le lien formé par les deux nœuds x et y ;
- $N1(x) = \{ y \in V : (x,y) \in E \}$: l'ensemble des voisins à un saut ayant des liens symétriques avec x ;
- $N2(x) = \{ \bigcup_{y \in N1(x)} N1(y) - N1(x) - \{x\} \}$: l'ensemble des voisins à deux sauts ayant des liens symétriques avec au moins un nœud de $N1(x)$. $N2(x)$ ne contient aucun nœud appartenant aussi à $N1(x)$;
- $D(x) = |\{i \in N1(x) : (x, i) \in E\}|$: le degré du nœud x . C'est le nombre d'arcs qui ont le nœud x pour origine ou pour destination;
- $B(x,y)$: est la bande passante disponible sur le lien (x,y) ;
- $Del(x,y)$: est le délai disponible sur le lien (x,y) ;
- $MPR(x)$: l'ensemble des relais multipoint d'un nœud x .

4.5.4 Description de notre solution

Notre solution prend en compte deux paramètres de QoS: la bande passante et le délai. Nous avons donc associé à chaque lien (x,y) un couple: $B(x,y)$, $Del(x,y)$. La figure (4.2) illustre un exemple de cette représentation. Une route R est définie par une séquence de nœuds de l'ensemble V allant d'un nœud source x_s et arrivant à un nœud de destination x_d , ne contenant pas de cycle.

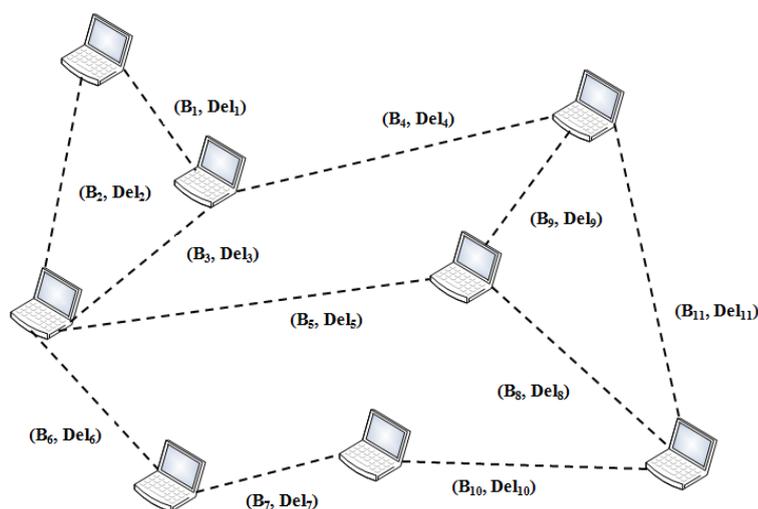


Figure 4.2: Exemple de représentation d'un MANET avec les deux métriques de QoS.

4.5.5 les paramètres de la QoS utilisés

Deux métriques de qualité de services sont utilisés par notre protocole QS-OLSR, à savoir: la bande passante et le délai. Ces métriques sont calculées en permanence et diffusées dans le réseau afin de répondre à la nature proactive de QS-OLSR. Un graphe topologique pondéré doit être disponible au moment de calcul d'une route pour un flux. Pour mesurer ces métriques, les messages de contrôles de QS-OLSR et le trafic de données sont utilisés. Nous considérons que chaque mobile est équipé par une carte sans fil 802.11 et nous utilisons la norme IEEE 802.11 comme couche MAC.

4.5.5.1 la bande passante

La bande passante est l'une des ressources critiques et limitées des réseaux mobiles. Les demandes en bande passante par des applications ne cessent d'accroître mais la transmission des données à une capacité supérieure à celle d'un chemin dans le réseau peut entraîner de graves congestions conduisant à l'écroulement du système. Donc, la mise en place d'une solution permettant la régulation du débit de transmission, en fonction de la bande passante disponible sur les différents liens d'une route est une nécessité incontournable.

Le calcul de la bande passante est un problème très difficile. Il constitue un sujet de recherche très actif dans les réseaux ad hoc. Plusieurs approches ont été proposées pour le calcul de la bande passante [94] [95] [101]. Nous avons opté pour

l'approche décrite dans [94]. Le choix de cette méthode est motivé par le fait qu'elle ne nécessite aucun trafic supplémentaire qui peut consommer plus de bande passante et d'énergie ou même surcharger le réseau et causer ainsi des congestions.

Cette méthode peut être décrite comme suit: soit x un nœud et y son voisin direct avec un lien symétrique. La bande passante disponible sur le lien (x,y) n'est pas forcément la même que celle du lien (y,x) . La bande passante B disponible sur le lien (x,y) est calculée par le nœud y puisque les messages de contrôle envoyés par x ne sont pas acquittés et il n'y a aucune information indiquant s'ils sont bien reçus ou non. B est donnée par la formule (4.1) suivante :

$$B(x, y) = (1 - u) \cdot B_{eff}(x, y) \quad (4.1)$$

Où:

- u : est le facteur d'utilisation du canal. $(1 - u)$ représente donc le taux de repos du canal.
- $B_{eff}(x, y)$ représente la bande passante effective des transmissions sur le lien (x,y) .

La bande passante effective d'un paquet ($B_{eff}(paquet)$), de taille S bits, est calculée par la formule (4.2) comme suit:

$$B_{eff}(paquet) = \frac{S}{T_{reception} - T_{transmission}} \quad (4.2)$$

Où:

- $T_{transmission}$: est l'instant de transmission du paquet par le nœud x ;
- $T_{reception}$: est l'instant de réception de ce paquet par le nœud y .

Au niveau de la couche MAC 802.11, la formule (4.2) est exprimé comme suit:

$$B_{eff}(paquet) = \frac{S}{t_q + (t_s + t_{ca} + t_{overh}) \cdot R + \sum_{R=1}^R B_T} \quad (4.3)$$

Avec t_q le temps de file d'attente (*time queue*), t_s le temps de transmission (*sent time*), t_{ca} le temps de phase de détection de collision (*Collision Avoidance*), t_{overh} temps de contrôle overhead (tel que RTS , CTS, ACK), R le nombre de retransmissions nécessaires et B_T le temps de *backoff*.

4.5.5.2 le délai

Certaines applications nécessitent souvent le respect d'un délai. Dans ce cas, l'estimation du délai entre nœuds voisins ou de bout en bout d'un chemin est nécessaire. Plusieurs méthodes ont été proposées, certaines estiment le délai de bout en bout tel que [88] [89] et [101], d'autres estiment le délai d'un lien (entre nœuds voisins) [94].

Dans notre proposition, nous nous intéressons au modèle d'estimation du délai d'un lien en utilisant les messages de contrôle Hello. Chaque nœud inclut, dans le message Hello, le moment de la création de ce dernier pendant la phase de découverte du voisinage et lorsque le message Hello est reçu par le nœud voisin, le délai est calculé en faisant la différence avec le temps horloge. Ce modèle ne peut être appliqué dans le cas où les horloges des différents nœuds ne sont pas synchronisées. Nous avons utilisé la technique présentée dans [94] qui suppose que les horloges sont synchronisées.

Notre choix pour ce modèle est justifié par le fait que cette méthode n'augmente pas la charge du trafic dans le réseau. Cela, permet de réduire les congestions et la consommation de ressources telles que : la bande passante et l'énergie.

4.5.6 Type et structure des paquets

chaque nœud du réseau doit détecter ses voisins avec lesquels il a un lien direct et symétrique. La nature du lien radio peut engendrer des coupures. Pour cela, les messages Hello diffusés sur le voisinage contiendront des informations sur l'état des liens. Chaque nœud doit estimer les paramètres de QoS (bande passante disponible, délai) avec ses voisins directs et avec lesquels il a un lien bidirectionnel. Les paramètres sont par la suite diffusés dans les messages appropriés.

4.5.6.1 Extension au message Hello

Les extensions apportées au format du message Hello (Figure 4.3) ont pour but de permettre aux nœuds voisins de découvrir les différents paramètres de QoS qui régissent le réseau.

0					1					2					3																
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
Reserved										Htime					Willingness																
Link Code					Reserved					Link Message Size																					
Neighbor Interface Address																															
Delay										Available Bandwidth																					
Neighbor Interface Address																															
Delay										Available Bandwidth																					
...																															
Link Code					Reserved					Link Message Size																					
Neighbor interface Address																															
Delay										Available Bandwidth																					

Figure 4.3: Format du message Hello dans QS-OLSR.

le message Hello ainsi présenté contient :

- la liste des adresses des voisins symétriques avec les valeurs des paramètres de QoS sur les liens respectifs ;
- la liste des adresses des voisins détectés ainsi que les valeurs des paramètres de QoS respectifs ;
- La liste des MPRs avec les valeurs de la QoS sur les liens qui relient le nœud local avec ses voisins .

les champs *Reserved*, *Htime*, *Willingness*, *link Code*, *Link Message Size* et *Neighbor Address* sont identiques à l'ancêtre OLSR. Ils sont décrits dans le chapitre 2.

Les paramètres de la qualité de service sont exprimés pour chaque voisin avec:

- Delay : mesure du délai exprimé en millisecondes;
- Available bandwidth : mesure la bande passante disponible sur le lien en question. Elle est exprimée en bits par seconde.

4.5.6.2 Format des extensions des bases d'informations

Pour pouvoir supporter les nouvelles métriques introduites au niveau du protocole, nous avons proposé une extension au niveau des bases d'informations. Pour cela, au niveau de chaque table, nous avons introduit les champs délai et bande passante disponible qui ont été véhiculé à travers le message Hello.

- Table d'informations des voisins

N_addr	N_statut	N_willingness	N_bandwidth	N_delay	N_time
--------	----------	---------------	-------------	---------	--------

Figure 4.4: Format de l'extension apportée à la table des voisins.

Avec N_addr l'adresse du voisin; N_statut désigne l'état de ce voisin, c'est-à-dire qu'il est MPR ou symétrique; N_willingness est un entier entre 0 et 7 qui caractérise la capacité de ce voisin à acheminer le trafic pour d'autres nœuds; N_bandwidth est la bande passante sur le lien qui relie le nœud local avec son voisin ; N_delay est le délai d'arrivée d'un paquet Hello entre les deux voisins ; N_time spécifie le temps de validité de cette information et quand cette entrée doit être supprimée de la table (voir figure 4.4) .

- Table des voisins à deux sauts

N_addr	N_2hop_addr	N_2hop_bandwidth	N_2hop_delay	N_time
--------	-------------	------------------	--------------	--------

Figure 4.5: Format de l'extension apportée à la table des voisins à deux sauts.

N_addr est l'adresse du nœud voisin permettant de joindre le nœud d'adresse N_2hop_addr avec un délai N_2hop_delay du nœud local et avec une bande passante disponible estimée à N_2hop_bandwidth. Cette information sera considérée comme non valide après N_time (voir figure 4.5).

- Table d'informations des relais multipoints

MS_addr	MS_bandwidth	MS_delay	MS_time
---------	--------------	----------	---------

Figure 4.6: Format de l'extension apportée à la table des MPR .

Avec MS_addr l'adresse du nœud qui a sélectionné le nœud local comme relais pour son trafic, se trouvant à un délai MS_delay de celui-ci, avec une bande passante disponible sur le lien qui les relie MS_bandwidth (voir figure 4.6).

4.5.6.3 Gestion de la topologie

Le protocole QS-OLSR fonctionne de la même façon qu'OLSR mais avec un format des tables et des messages TC plus étendu. le message *Topology Control* sera de la forme illustrée à la figure 4.7.

0					1					2					3																
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
ANSN										Reserved																					
Advertised Neighbor Main Address																															
Delay										Available Bandwidth																					
Advertised Neighbor Main Address																															
Delay										Available Bandwidth																					
Advertised Neighbor Main Address																															
Delay										Available Bandwidth																					
...																															

Figure 4.7: Format d'un message TC avec le protocole QS-OLSR.

les champs Delay et Available Bandwidth ajoutés sont les paramètres de la qualité de service stockés dans les tables et diffusés à travers ce message. Le format de la table topologique aura donc le format suivant figure 4.8.

T_dest	T_last	T_bandwidth	T_delay	T_seq	T_time
--------	--------	-------------	---------	-------	--------

Figure 4.8: Format de la table topologique.

Pour chaque destination du réseau, la table de topologie contient l'adresse T_dest du nœud. Celui-ci peut être atteint par son voisin T_last avec un délai T_delay. T_seq et T_time sont respectivement le numéro de séquence et le temps de validité du tuple.

4.5.6.4 Routage

Chaque nœud du réseau maintient une table de routage ayant le format de la figure 4.9:

R_addr	R_next	R_dist	R_bandwidth	R_delay
--------	--------	--------	-------------	---------

Figure 4.9: Format de la table de rouatge .

Par la suite, pour remplir la table de routage, le nœud ne considère plus la métrique de nombre de sauts, mais plutôt la bande passante et le délai .C'est-à-dire que le nœud cherche une route non plus la plus courte en nombre de sauts mais plutôt la plus optimale en terme de qualité de service (bande passante et délai).

4.5.7 Notre algorithme de sélection des relais multipoints

L'amélioration que nous proposons de faire consiste à sélectionner pour chaque nœud l'ensemble optimal de ses MPRs en terme de QoS. Pour cela, s'il existe un voisin à 2-saut couvert par plusieurs voisins à 1-saut, alors celui dont le lien possédant la plus grande bande passante menant vers ces derniers est sélectionné comme MPR. En cas d'égalité entre deux ou plusieurs voisins alors celui qui possède le délai minimal est choisi.

Dans le cas écheant où il y a encore une égalité de délais, nous comparons les bandes passantes des liens menant vers le nœud à 2-saut. Celui dont le lien possède une plus grande bande passante est alors sélectionné comme MPR.

Notons que l'ensemble des MPRs d'un nœud est recalculé dans les cas suivants :

- Un changement dans le voisinage direct est détecté: l'apparition ou la disparition d'un lien bidirectionnel .
- Un changement dans le voisinage à deux sauts est détecté: l'apparition ou la disparition d'un lien bidirectionnel.
- Un changement dans la bande passante ou le délai sur un lien direct ou à deux sauts est détecté. En effet, chaque nœud mesure le pourcentage de changement de la bande passante et le délai entre l'ancienne et la nouvelle valeur calculée est sur un intervalle de temps. Si ce pourcentage dépasse un seuil pour la bande passante de même pour le délai, le nœud doit recalculer ses MPRs.

Les étapes de l'algorithme se présentent comme suit :

```
Entrees: N1(x), N2(x)
Debut
Etape 1: MPR(x) = {}
Etape 2: Tantque (N2(x) <> {}) Faire
    Calculer(D(y));
    Si( (|N(y) couvrant z|) = 1)
        MPR(x) = y;
        N2(x) = N2(x) - z;
    sinon
        Consulter la valeur de la bande passante des liens menant vers y;
        si (B(x,y1) <> B(x,y2))
            MPR(x) = MAX (B(x,y1), B(x,y2));
            N2(x) = N2(x) - z;
        sinon
            Consulter la valeur du délai des liens menant vers y;
            si (Del(x,y1) <> Del(x,y2))
                MPR(x) = MIN(Del(x,y1), Del(x,y2));
                N2(x) = N2(x) - z;
            sinon
                Consulter la valeur de la bande des liens menant vers z;
                si (B(y1,z) <> B(y2,z))
                    MPR(x) = MAX (B(y1,z), B(y2,z));
                    N2(x) = N2(x) - z;
                sinon
                    Consulter le degré de chacun des n\oeuds;
                    MPR(x) = MAX (D(y1), D(y2));
                    N2(x) = N2(x) - z;
                FinSi;
            FinSi;
        FinSi;
    FinTantque;
Fin
```

L'algorithme de sélection des MPR est donné par le l'organigramme de la figure 4.10.

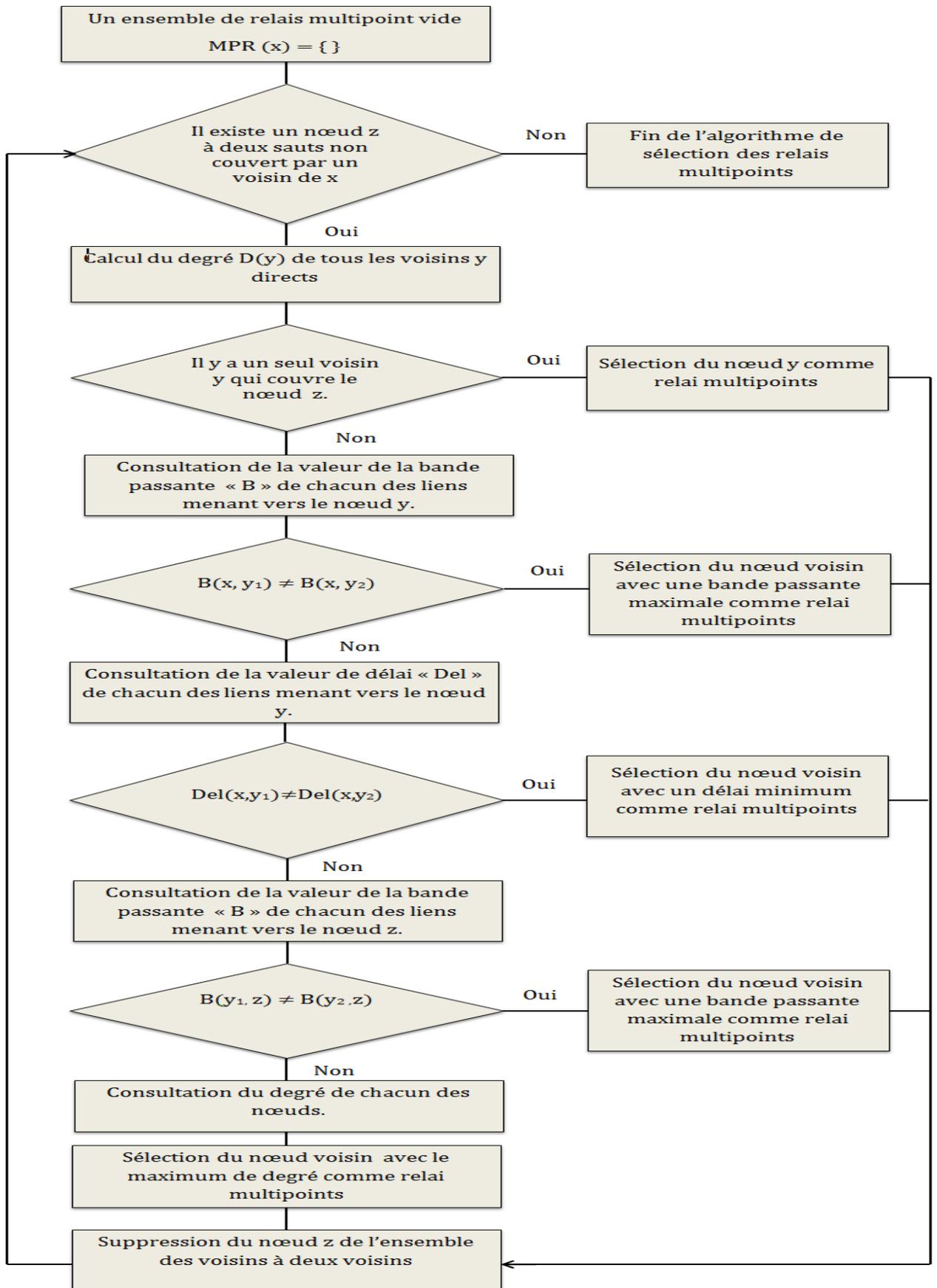


Figure 4.10: Organigramme de sélection des relais multipoints.

4.5.7.1 Exemple d'application

Pour illustrer le fonctionnement de l'algorithme proposé, nous supposons un réseau composé de douze noeuds (figure 4.11):

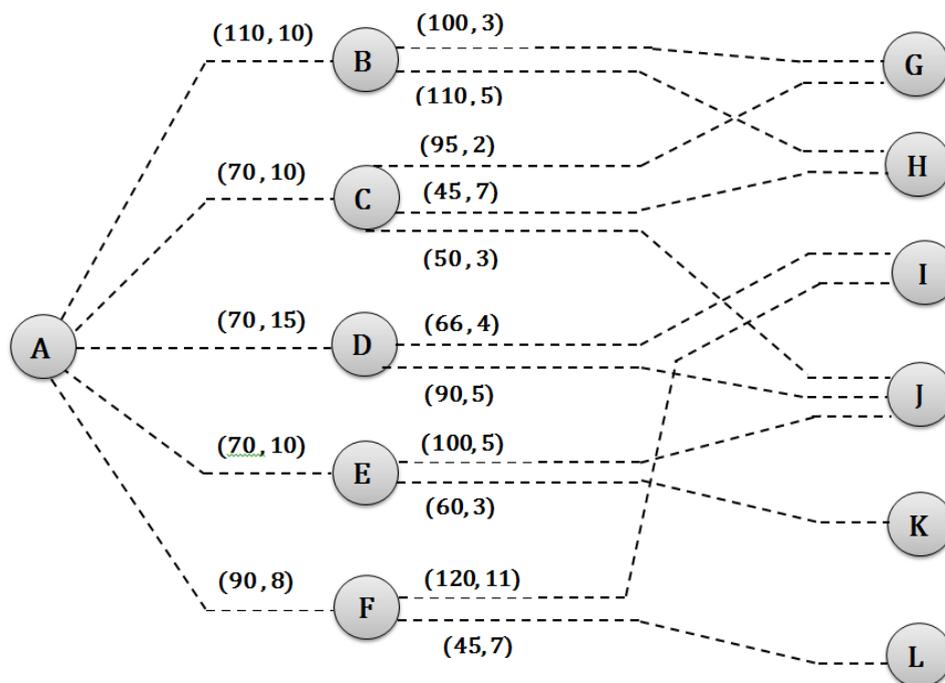


Figure 4.11: Exemple de sélection des relais multipoints.

- **Les MPRs sélectionnés par OLSR natif**

Le protocole OLSR natif se base sur le degré pour la sélection des MPRs de chacun de ses noeuds, pour cela le noeud A sélectionne le noeud C comme MPR car son degré $D(c)=3$, ce dernier couvre l'ensemble des noeuds suivant à savoir le noeuds G, H et J . Donc l'ensemble des noeuds à deux sauts qui ne sont pas encore couverts sera composé des noeuds suivants (I, K, L).

Les noeuds E, F sont les seuls offrant des liaisons respectivement aux noeuds K et L c'est pour cette raison il seront sélectionnés comme des MPRs . L'ensemble des MPRs est donné dans la table 4.1 :

- **Les MPRs sélectionnés selon QS-OLSR**

Le protocole QS-OLSR ne se base pas sur le calcul d'un ensemble minimal de noeuds permettant d'atteindre plusieurs voisins lointains mais plutôt sur le calcul des voisins

Nœud	Voisins à un saut $N1(A)$	Voisin à deux sauts $N2(A)$	MPR(A)
A	B, C, D, E, F	G, H, I, J, K, L	C, E, F

Table 4.1: Les MPRs sélectionnés par le nœud A dans le protocole OLSR natif

offrant plus de bande passante et un délai moindre. Appliqué à l'exemple précédent illustré par la figure 4.11 nous obtiendrons ce qui suit:

Le nœud **G** est couvert par les deux nœuds **B** et **C**. Dans ce cas, nous comparons les métriques des liens les reliant à **A**. Le nœud **B** sera choisi comme MPR puisque la bande passante disponible sur son lien (110) est supérieure à celle de **C** (70).

Par ailleurs, le nœud **H** est aussi couvert par **B**. C'est alors que l'ensemble des nœuds à 2- sauts non couverts sera réduit aux nœuds suivants $N2(A)=\{ \mathbf{I},\mathbf{J},\mathbf{K},\mathbf{L}\}$.

Les deux nœuds **D** et **F** couvrent un même nœud qui est le nœud **I** donc une comparaison est faite sur les métriques des liens entre les nœuds **D**, **F** et le nœud **A** qui sont respectivement (70,15), (90,8). Le nœud **F** est alors ajouté à l'ensemble des MPRs puisque il présente le lien avec une plus grande bande passante. l'ensemble de voisinage à 2-saut est de nouveau restreint aux nœuds **J**, **K**, **L**.

le cas du nœud **J** illustre bien l'idée de notre algorithme. Il est couvert par trois nœuds **C**, **D**, **E**. La comparaison des bandes passantes révèle une égalité entre les trois nœuds, en effet, (70,10), (70,15), (70,10) représentent les poids des liens (A,C), (A,D) et (A,E) respectivement. Ceci nous mène à une comparaison basée sur le plus court délai présenté par ces liens. D'après les valeurs sus-citées le nœud **D** est hors concours vu qu'il présente un délai supérieur à ceux de **C** et **E**.

Comme nous nous retrouvons devant une égalité de délai entre les nœuds **C** et **E** alors nous procédons à une sélection basée sur la plus grande bande passante présenté par le lien à 2-saut. Dans cet exemple, vu que le poids du lien (E,J) est égale à (100,5) et que celui de (C,J)=(50,3), alors le nœud E est sélectionné comme MPR de **A**.

Le nœud **L** est couvert uniquement par le nœud **F**, de ce fait, ce dernier est sélectionné comme MPR. De même pour le nœud **E** qui offre une liaison avec le nœud **K** que seul celui-là permet de l'atteindre. Le tableau 4.2 montre les MPRs sélectionnés selon le protocole QS-OLSR:

Nœud	Voisins à un saut $N1(A)$	Voisin à deux sauts $N2(A)$	MPR(A)
A	B, C, D, E, F	G, H, I, J, K, L	B, F, E

Table 4.2: Les MPRs sélectionnés par le noeud A dans le protocole QS-OLSR

Comparé au OLSR natif, la cardinalité de l'ensemble des MPRs peut être égale ou plus grande dans QS-OLSR, et cela est amplement justifié vu que notre objectif est de trouver un routage optimal en terme de QoS et non pas en terme de nombre de sauts.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les spécifications de notre solution QS-OLSR qui a permis d'étendre le protocole OLSR pour garantir la QoS en termes de délai et de bande passante. Nous avons également détaillé son principe de fonctionnement.

Ce chapitre a été dédié à la conception de notre protocole QS-OLSR. Nous y avons abordé les principales méthodes d'estimations du délai et de la bande passante ainsi que les différents types de paquets qui montrent les relations entre les différents messages du protocole. Enfin nous avons illustré notre algorithme avec un exemple applicatif.

Dans le chapitre suivant, nous réalisons une série de simulations à l'aide de l'outil OPNET Modeler [93] pour mettre en exergue les performances des résultats obtenus par notre protocole QS-OLSR.

5

Simulations et Résultats

5.1 Introduction

Après avoir décrit la conception de notre solution dans le chapitre précédent, nous allons maintenant présenter son implémentation ainsi que son évaluation. L'évaluation de performance des protocoles de routage peut se faire en utilisant trois techniques, à savoir : la méthode analytique, les tests réels, et enfin la simulation.

La majorité des travaux d'évaluation de performance utilise l'approche par la simulation vu les avantages qu'elle offre. En effet, elle est simple, rapide, moins coûteuse et permet de réaliser un plus grand nombre de scénarios en faisant simplement varier les paramètres du modèle. Or l'utilisation d'une approche par tests réels nécessite de disposer d'un réseau réel et ceci est difficile, coûteux et rigide et n'offre pas la souplesse de varier les différents paramètres de l'environnement. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'implémenter notre solution sous le simulateur de réseaux OPNET Modeler 14.5.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord le simulateur OPNET Modeler 14.5 ainsi que l'implémentation du protocole QS-OLSR dans ce simulateur. Ensuite, nous définissons le contexte de simulation de notre solution. Enfin, nous exposons les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations .

5.2 Les simulateurs existants

De nombreux simulateurs de réseaux ont été développés. Nous citons, par exemple : NS3 [92], OmNet++[99], GloMoSim [90], QualNet [91], OPNET modeler [93]. La table 5.1 illustre les différentes caractéristiques des simulateurs cités ci-dessus.

simulateur	Commercial / Open Source	Version éducative	Type de simulation	Protocole supporté
OPNET	Commercial	Oui	DES, Orienté Objet	MANET, FDDI, WIFI, TCP, ATM, Wireless, ...
GloMoSim	Open Source	Oui	Libreries basées sur le parallélisme	Wireless
QualNet	Commercial	Non	Distribuée et parallèle	Wired ,WLAN Wireless
OmNet++	Open Source	Oui	Modules DES	Wireless
NS-3	Open Source	Oui	Modules DES	Multicast routing , TCP, MANET, Wireless

Table 5.1: Listes des simulateurs réseaux et leurs fonctions.

5.2.1 Raisons du choix de OPNET Modeler

L'éventail de choix s'est restreint aux deux simulateurs supportant les protocoles MANET à savoir OPNET [93] et NS3 [92]. Le choix entre ces deux derniers était difficile, mais certains points positifs à OPNET ont joué en sa faveur, à savoir:

- OPNET supporte les protocoles MANET les plus efficaces;
- OPNET dispose du protocole OLSR natif sur sa plateforme;

- La présence d'une documentation très intéressante et des tutoriels intégrés dans l'application OPNET Modeler;
- OPNET est un simulateur basé sur Discrete Event Simulation (DES) qui prend en charge le traitement parallèle;
- OPNET utilise la plateforme Windows et il possède une interface graphique conviviale.

Or son installation nécessite d'abord la présence de l'une des versions de Visual studio compatible avec la version de Windows installée pour l'importation des différentes bibliothèques C/C++.

5.3 Présentation de OPNET Modeler

Initialement développé au MIT (Massachusetts Institute of technology) et commercialisé en 1987 comme le premier simulateur de réseaux, OPNET s'est bien imposé dans le monde de la recherche et du développement. OPNET est une offre de logiciels de modélisation et de simulation de réseaux s'adressant à différents publics : " OPNET Modeler" pour la communauté de la recherche scientifique, " SP Guru " pour les opérateurs et " IT Guru " pour les entreprises .

OPNET Modeler [93] est un simulateur à événements discrets qui offre un environnement de modélisation graphique. Il permet la simulation et l'étude des performances des réseaux et des protocoles de communication avec une grande flexibilité. Il permet aussi la modélisation de toutes les couches du modèle OSI d'un système de communication grâce à des bibliothèques de modèles de nœuds et de liens prédéveloppés (routeurs, commutateurs, stations de travail , serveurs, téléphone portable, satellite , liaison point à point, liaison par bus et liaison satellite) et des protocoles (TCP/IP, FTP, FDDI , Ethernet , ATM . . .). Le modèle spécifique " *Wireless Radio*" permet la simulation des réseaux de radiocommunication courtes et longues distances ainsi que les réseaux satellitaires.

5.3.1 Concepts de bases du simulateur OPNET

Cette section explique les concepts de base et le fonctionnement général du simulateur OPNET Modeler[93]. Ce simulateur est basé sur une série d'éditeurs hiérarchisés et d'interfaces graphiques qui parallélisent la structure du réseau réel, des

équipements et des protocoles (le domaine réseau, le domaine équipement et le domaine processus).

5.3.1.1 Présentation des interfaces

Parmi les nombreuses interfaces que propose OPNET Modeler au démarrage , nous trouvons :

- **Editeur de projet**

L'interface principale du logiciel permet d'implanter des modèles issus des bibliothèques OPNET ainsi que des modèles créés par l'utilisateur, de configurer puis lancer des simulations et visualiser les résultats. La figure 5.1 illustre les principales fonctions de cette interface sous forme d'icônes (Ouvrir la palette d'objet, Vérification des liens, Mise en panne/Remise en marche d'un appareil ou d'un lien collectés, Visualiser les graphiques et statistiques, Visualiser le rapport le plus récent, Zoom +/−, Retour au réseau supérieur, Lancer la simulation, Visualiser tous les graphiques ...).

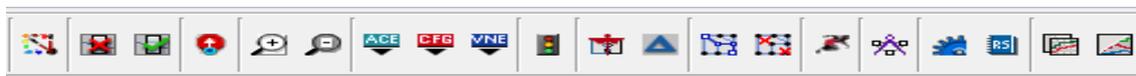


Figure 5.1: Editeur de projet.

- **Editeur de réseaux**

Le domaine réseau définit la topologie du réseau de communication dans l'éditeur de projet (*Network Model Editor*). Les entités communicantes du réseau (Figure 5.2) sont des nœuds (routeurs, hôtes, commutateurs ...) reliés entre eux par des liens. Chaque entité est affectée à un modèle qui spécifie ses fonctions dans la fenêtre éditeur de nœud (*Node Model Editor*).

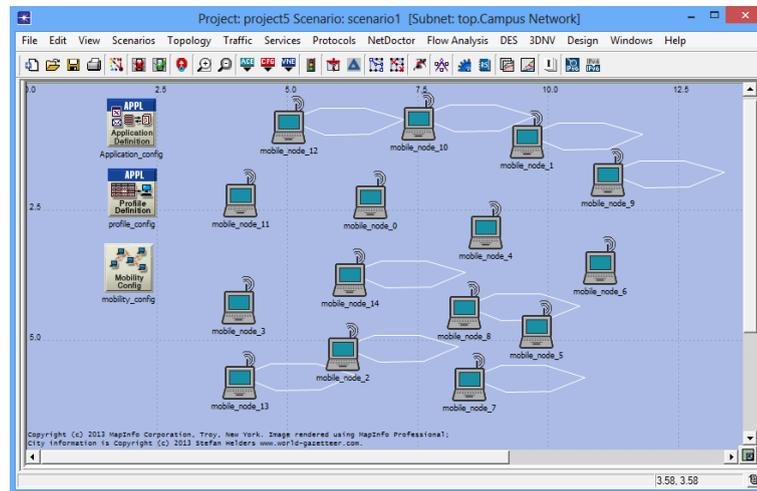


Figure 5.2: Editeur de réseaux.

- Editeur d'équipements

Le domaine d'équipement permet de concevoir dans la fenêtre de l'éditeur d'équipements (*Node Model Editor*) les éléments qui peuvent envoyer et recevoir des données et peuvent également être connectés dans le domaine réseau (entités communicantes). Un équipement (Figure 5.3) est formé d'un ensemble de blocs fonctionnels appelés modules de processus (processus, files d'attente, générateurs, émetteurs, récepteurs, antennes ...). Chaque module peut générer, envoyer et recevoir des paquets des autres modules pour réaliser sa fonction. Les modules représentent les applications, les couches de protocoles, les algorithmes, les ressources physiques comme les buffers, les ports TCP et les bus de données.

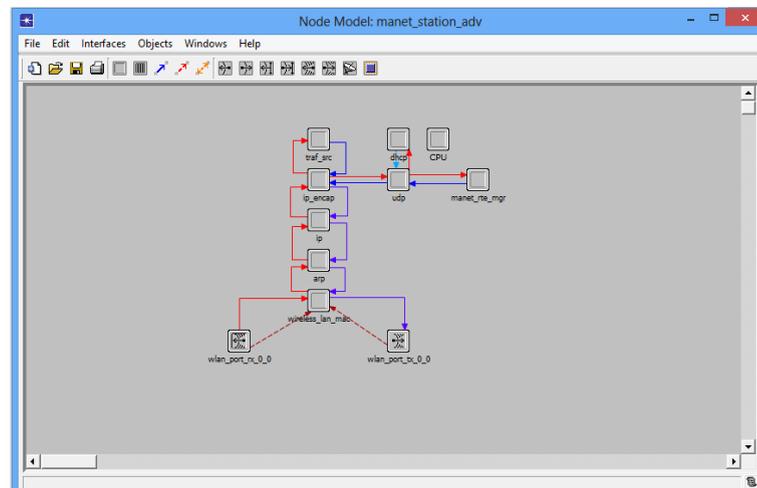


Figure 5.3: Editeur d'équipement.

- **Editeur de processus**

Le domaine processus définit le comportement d'un module appartenant à un équipement par un diagramme d'état finis (**FSM: *Finite State Machine***) qui décrivent les conditions pour passer d'un état à un autre (Figure 5.4), les états sont codés en langage C ou C++.

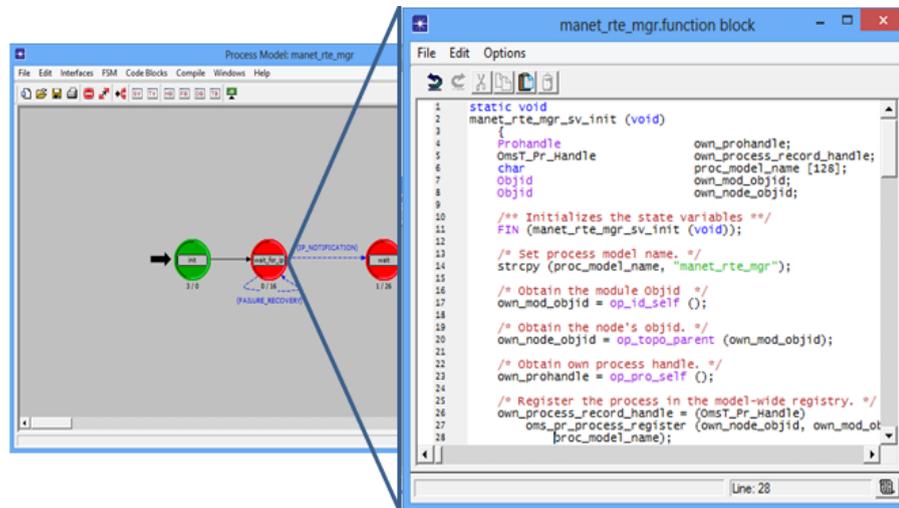


Figure 5.4: Editeur de processus.

- **Antenna Pattern**

Cette interface permet de modéliser une antenne pour radiocommunication par son diagramme de rayonnement 3D, coordonnées polaires.

- **Modulation Curve**

Donne une visualisation du taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit pour différents types de modulations (BPSK, MSK, FSK, ...).

- **Simulation Sequence**

Permet de paramétrer la ou les simulations OPNET en temps et attributs des modèles (types de liens, d'antenne, de services ...).

- **Analysis Configuration**

Permet le stockage des résultats issus des simulations sous différentes formes.

- **Packet format editor**

Permet de définir la structure interne des formats de paquets (pour les réseaux filaires et sans fil) en décrivant en détails tous les champs qui les composent.

5.3.1.2 Cycle traditionnel d'un projet sous OPNET

Il y a six phases dans le cycle de modélisation et de simulation sous OPNET, nous commençons par la phase de création de projets (*Project creation*), puis la création ou/et la mise à jour d'un scénario (*Scenario creation/update*), ensuite le choix des statistiques à collecter (*Choose statistics*), après soit nous procédons au lancement des simulations (*Simulation execution*) soit à la duplication du scénario (*Scenario duplication*) et enfin la comparaison des résultats (*Results analysis*). Si nous avons besoin de mise à jour du scénario, nous recommençons à partir de la deuxième phase (voir figure 5.5).

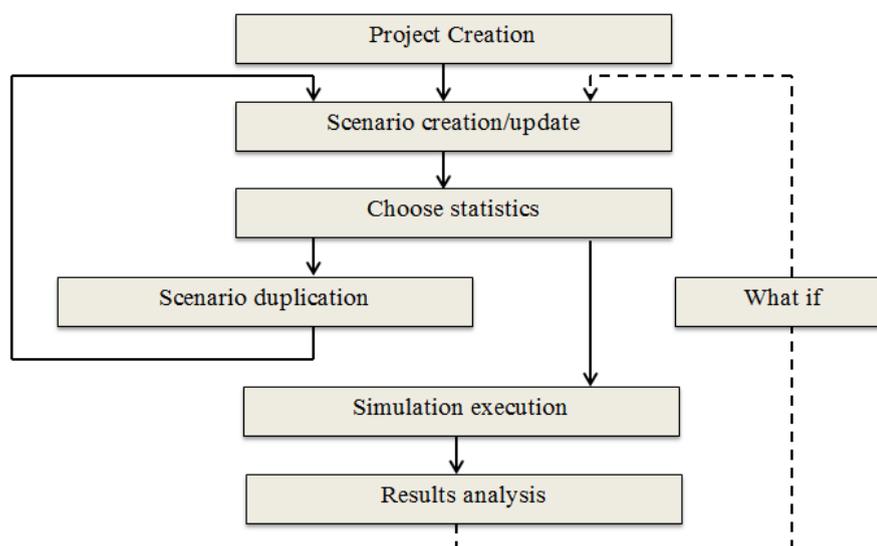


Figure 5.5: Etapes de modélisation et simulation d'un projet.

5.4 Etapes d'implémentation de QS-OLSR

La version de OPNET Modeler 14.5 propose des modèles pour diverses stations équipées d'une carte sans fil. Le modèle d'une station de travail est une architecture constituée de plusieurs composants. Tous ces composants fonctionnent sur une base de paramètres initialisés à des valeurs par défaut, mais que l'utilisateur peut modifier selon ses besoins. Il est également possible d'accéder au code de chaque modèle et d'en modifier le fonctionnement à des fins de recherche. Le composant Routing Manager (`manet_rte_mgr` sur la figure 5.6) est responsable de l'initialisation du protocole de routage choisi sur la station.

Pour les réseaux mobiles ad hoc, le Modeler 14.5 propose le choix entre les protocoles de routage DSR[62], AODV[58], OLSR[34], TORA[43] et GRP. Un protocole de routage peut être remplacé par un autre sur une station sans entraîner une quelconque modification sur les autres composants dans la modélisation de la station. La figure 5.6 illustre le modèle d'une station équipée d'une carte sans fil ainsi que son modèle de processus.

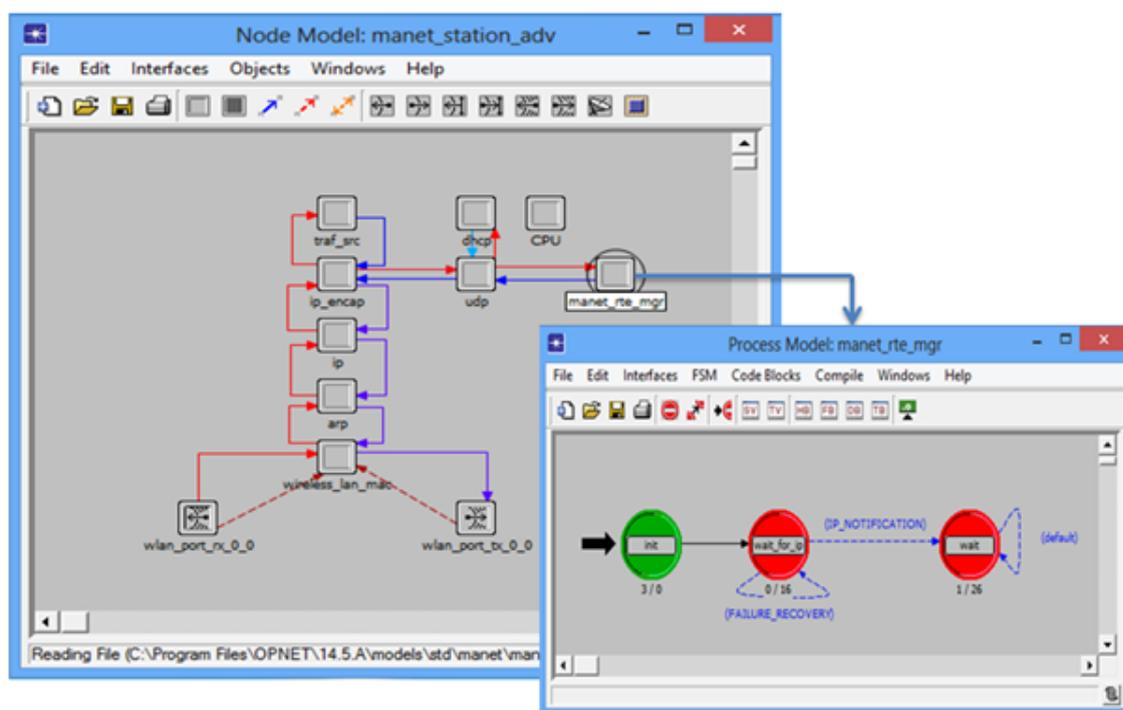


Figure 5.6: Modèle d'une station équipée d'une carte sans fil.

5.4.1 Modèle d'architecture de OLSR

Le protocole OLSR est le processus fils du processus racine `manet_rte_mgr`. Les paquets en provenance des couches inférieures sont passés à `manet_rte_mgr` par UDP, qui à son tour les remet au processus OLSR. Les paquets de contrôle (Hello et les messages TC) sont envoyés directement en utilisant UDP sur le port spécifié par le processus fils OLSR. La figure 5.7 illustre cette architecture.

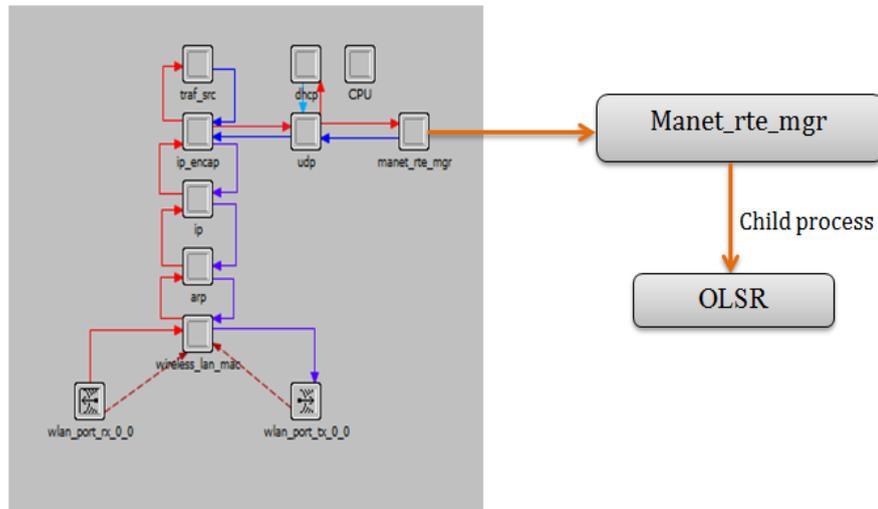


Figure 5.7: Modèle d'architecture de OLSR.

Le modèle OLSR utilise les modèles de processus indiqués dans le tableau 5.2:

Processus	Description
Manet_rte_mgr	C'est le Processus racine qui engendre le protocole de routage OLSR s'exécutant sur un nœud. Il se trouve au-dessus du module UDP.
Olsr_rte	Le processus de routage OLSR est un enfant du processus manet_rte_mgr. Si OLSR est configuré sur le nœud, le processus olsr_rte est engendré par le manet_rte_mgr pour exécuter OLSR sur celui-ci.

Table 5.2: Modèles processus du protocole OLSR.

5.4.2 Modèle d'OLSR dans OPNET

Le protocole OLSR est disponible sous la forme d'un process model (olsr_rte.pr.m) représenté par des états et des transitions (Figure 5.8). Le premier état procède à l'initialisation du protocole et des interfaces associées, ensuite il passe à l'état suivant et réagit aux événements. Ces derniers sont essentiellement liés à la réception de messages HELLO et TC, ainsi qu'aux délais d'expiration associés au calcul des routes.

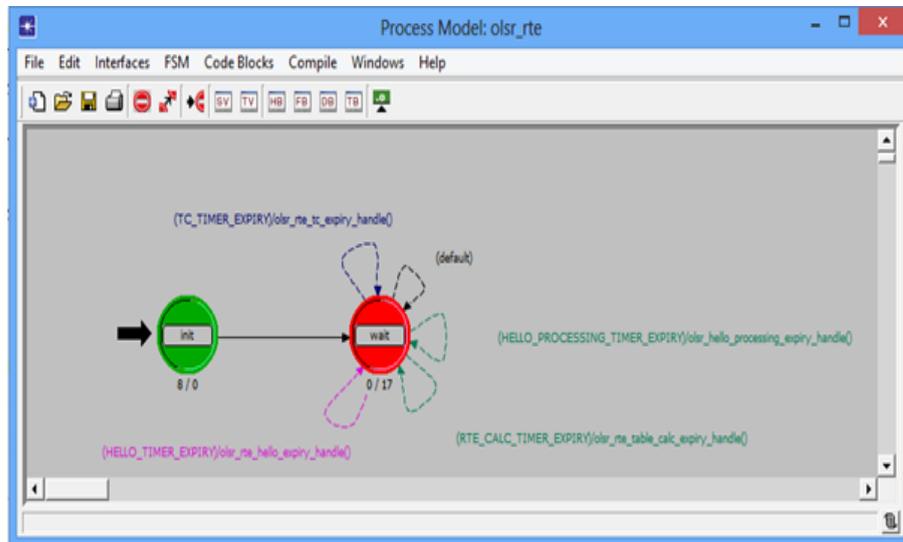


Figure 5.8: Modèle olsr-rte.

Les boutons SV et TV en dessous du menu permettent d'accéder respectivement aux définitions des variables globales et locales. Le bouton HB (*Header Block*) donne accès au code du fichier entête contenant les inclusions de bibliothèques ainsi que les définitions des structures de données et des fonctions. Le bouton FB (*Fonction Block*) donne accès au fichier implémentant les fonctions définies en HB. Le code est écrit en C/C++.

5.4.2.1 Structure des tables dans le modèle OLSR

La (Figure 5.9) illustre les différentes tables disponibles dans le modèle OLSR

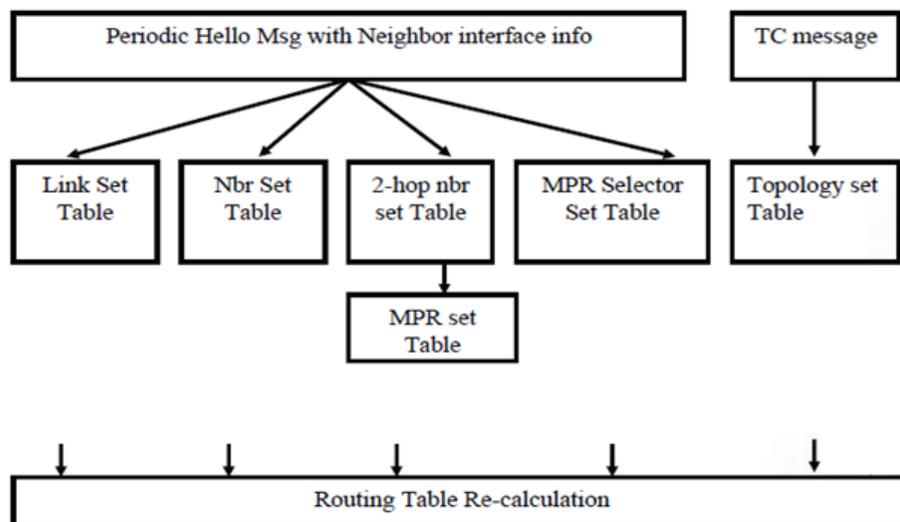


Figure 5.9: Structure des tables dans le modèle OLSR.

5.4.3 Implémentation de QS-OLSR dans OPNET

Afin de préserver la compatibilité avec les autres composants, QS-OLSR conserve la même structure qu'OLSR et son invocation se fait par le biais du *Routing Manager*. Les modifications introduites dans le modèle du protocole OLSR, dans l'optique de mettre en œuvre la solution proposée, peuvent être résumées comme suit:

- Le fichier d'entête contenant les définitions de la structure de données associées aux messages *Hello* (figure 5.10) est modifié afin d'introduire les informations nécessaires au traitement des paramètres de la QoS;

```
typedef struct {
    int     nbr_addr;
    int     status;
    int     willingness;
    int     link_entry_count;
    List    two_hop_nbr_list;
    int     reachability;
    int     degree;
    int     sym_link_entry_count;
    Boolean mpr_selector;

    double x_cord;
    double y_cord;
    double z_cord;
    int nbselectors;
    int     control_msg_count;
    int     packet_size;
    double  packet_delay;
    double  window_start;
} OlsrT_Neighbor_Set_Entry;
```

Figure 5.10: Structure de données modifiée et associée aux messages Hello..

- L'algorithme de sélection des MPR est remplacée par notre version qui prend en compte deux métriques (Bande passante , Délai). La figure 5.11 illustre le code de sélection des MPR.

```

static void
olsr_rte_calculate_mpr_set_qos (void)
{
    int    num_one_hop, num_strict_two_hops = 0;
    double    current_delay;
    int current_bp, bp_deux_saut;
    int    nbr_lien=0, nbr_lien_temp=0, num_keys, num_keys2, i, j, k, willingness,
        reachability;
    OlsrT_Neighbor_Set_Entry* mpr_candidate_ptr = OPC_NIL;
    OlsrT_Neighbor_Set_Entry* nbr_set_entry_ptr = OPC_NIL;
    OlsrT_Two_Hop_Neighbor_Set_Entry*          two_hop_nbr_entry_ptr=
        OPC_NIL;
    OlsrT_Link_Set_Entry* link_set_entry_ptr;
    List*    keys_lptr = OPC_NIL;
    List*    keys_lptr2 = OPC_NIL;
    Boolean    phase_2 = OPC_FALSE;
    int tab[400];
    PrgT_List_Cell * key_cell_ptr;
    FIN (olsr_rte_calculate_mpr_set_qos (void));
    op_stat_write (global_stat_handles.mpr_calcs_global_shandle, 1.0);
    num_strict_two_hops = olsr_rte_strict_two_hop_set_create ();
    num_one_hop = olsr_rte_calculate_degree ();
    olsr_rte_mpr_with_nbr_count_one_add (&num_strict_two_hops);
    keys_lptr = (List*) prg_bin_hash_table_item_list_get (neighbor_set_table);
    num_keys = op_prg_list_size (keys_lptr);
    keys_lptr2= (List*) prg_bin_hash_table_item_list_get(two_hop_nbr_set_table
        );
    num_keys2=op_prg_list_size(keys_lptr2);
    if(num_strict_two_hops > 0){
        k=0;
        do { olsr_rte_calculate_reachability (keys_lptr);
            willingness = -1;
            reachability = 0;
            j=0; current_bp=0;
            bp_deux_saut=0; current_delay;
            mpr_candidate_ptr = OPC_NIL;
            two_hop_nbr_entry_ptr = (OlsrT_Two_Hop_Neighbor_Set_Entry*)
            op_prg_list_access (keys_lptr2, k); k++;
            for (key_cell_ptr = prg_list_head_cell_get (keys_lptr);
                key_cell_ptr;

```

```

        key_cell_ptr = prg_list_cell_next_get (key_cell_ptr)){
    OlsrT_Neighbor_Set_Entry* nbr_set_entry_ptr =(OlsrT_Neighbor_Set_Entry*
) prg_list_cell_data_get (key_cell_ptr);
PrgT_List_Cell* list_cell_ptr;
    for (list_cell_ptr = prg_list_head_cell_get (&nbr_set_entry_ptr->
        two_hop_nbr_list);
        list_cell_ptr;
        list_cell_ptr = prg_list_cell_next_get (list_cell_ptr)) {
        OlsrT_Two_Hop_Neighbor_Set_Entry * two_hop_addr_ptr =
        (OlsrT_Two_Hop_Neighbor_Set_Entry*) prg_list_cell_data_get (
            list_cell_ptr);
    if(two_hop_addr_ptr->two_hop_addr==two_hop_nbr_entry_ptr->two_hop_addr)
        { nbr_lien++;
        tab[j]=nbr_set_entry_ptr->nbr_addr;
        j++;
        } } }
    if(nbr_lien==1){
        for (i=0; i< num_keys; i++){
            nbr_set_entry_ptr = (OlsrT_Neighbor_Set_Entry*) op_prg_list_access
                (keys_lptr, i);
            if(tab[0]==nbr_set_entry_ptr->nbr_addr) {
                printf("MPR condidate ");
            mpr_candidate_ptr = nbr_set_entry_ptr;
            } }
        }else if(nbr_lien>1){
            nbr_lien_temp=nbr_lien;
            for (i=0; i< num_keys; i++){
nbr_set_entry_ptr = (OlsrT_Neighbor_Set_Entry*) op_prg_list_access (
                keys_lptr, i);
for(j=0;j<nbr_lien_temp;j++){
            if(tab[j]==nbr_set_entry_ptr->nbr_addr){
                if ((nbr_set_entry_ptr->status == OLSRC_SYM_STATUS) &&
                    (nbr_set_entry_ptr->willingness != OLSRC_WILL_NEVER) &&
                    (nbr_set_entry_ptr->nselectors != OLSRC_VALUE_REJECTED) &&
                    (nbr_set_entry_ptr->reachability > 0)){
                    if((link_set_entry_ptr=olsr_rte_link_set_entry_get(
                        nbr_set_entry_ptr->nbr_addr,own_main_address))!=
                        OPC_NIL){

```

```

        if (nbr_set_entry_ptr->reachability > reachability){
            mpr_candidate_ptr = nbr_set_entry_ptr;
            willingness = nbr_set_entry_ptr->willingness;
            reachability = nbr_set_entry_ptr->reachability;
            current_delay=link_set_entry_ptr->indelay;
            current_bp=(int)link_set_entry_ptr->inbdwdth;
        }else if((int)link_set_entry_ptr->outbdwdth > current_bp){
            mpr_candidate_ptr = nbr_set_entry_ptr;
            current_delay=link_set_entry_ptr->indelay;
            current_bp=(int)link_set_entry_ptr->inbdwdth;
            willingness = nbr_set_entry_ptr->willingness;
            reachability = nbr_set_entry_ptr->reachability;
        }else if((int)link_set_entry_ptr->inbdwdth == current_bp){
            if (link_set_entry_ptr->indelay< current_delay){
mpr_candidate_ptr = nbr_set_entry_ptr;
current_delay=link_set_entry_ptr->indelay;
current_bp=link_set_entry_ptr->inbdwdth;
willingness = nbr_set_entry_ptr->willingness;
            reachability = nbr_set_entry_ptr->reachability;
        }else
            if (link_set_entry_ptr->indelay== current_delay){
                if((int)link_set_entry_ptr->outbdwdth >
                    bp_deux_saut){
                    mpr_candidate_ptr = nbr_set_entry_ptr;
                    willingness = nbr_set_entry_ptr->willingness;
                    reachability = nbr_set_entry_ptr->reachability;
                }else if (nbr_set_entry_ptr->willingness >
                    willingness){
                    mpr_candidate_ptr = nbr_set_entry_ptr;
                    willingness = nbr_set_entry_ptr->willingness;
                    reachability = nbr_set_entry_ptr->reachability;
                } } }
                bp_deux_saut=(int)link_set_entry_ptr->outbdwdth;
            } } }
        } } }
        mpr_candidate_ptr->reachability = OLSRC_VALUE_MPR;
        olsr_rte_update_strict_two_hop_set_qos (&num_strict_two_hops,
            mpr_candidate_ptr);
    } while (num_strict_two_hops > 0);
}
prg_list_destroy (keys_lptr, OPC_FALSE);
olsr_rte_build_new_mpr_set ();
FOUT;
}

```

Figure 5.11: Fonction de sélection des MPRs.

- Les structures de données représentant les tables des voisins à un et deux sauts, ainsi que les liens sont modifiées (figure 5.12) afin de conserver les informations de qualité de service associées aux liens, les associations entre les voisins à deux sauts et les MPRsélectionnés pour la qualité de service. Les fonctions associées à ces opérations sont modifiées en conséquence ;

```

struct OlsrT_Link_Set_Entry
{
double    SYM_time;
double    ASYM_time;
double    expiry_time;

Evhandle  sym_time_expiry_evhandle;
void*     nbr_entry_ptr;
OlsrT_Link_Set_Entry* next_link_set_entry_ptr;
OlsrT_Link_Set_Key key;

int inbdwdth;
double indelay;
double outbdwdth;
double outdelay;
};

```

Figure 5.12: Structure de données associée aux liens.

- Pour le calcul des routes proactives, l'algorithme de Dijkstra est complété par notre procédure de comparaison des routes alternatives vers chaque destination en vue de sélectionner une route optimale. La Figure 5.13 montre la structure de données de l'algorithme de Dijkstra.

```

typedef struct {
int    local_intf;
int    neighbor_intf;
double bdwdth;
double delay;
double loss;
} OlsrT_Djk_Edge_State;

```

Figure 5.13: Structure de données de l'algorithme Dijkstra.

- La structure du graphe qui contient la vue locale de la topologie du réseau est modifiée afin de pouvoir intégrer les valeurs des métriques de qualité de service comme des poids sur les arcs correspondants;

En dehors des variables, des fonctions, des structures de données et des fichiers concernés par ces changements, aucune autre modification n'a été portée au modèle du protocole OLSR initial.

5.5 Objectifs de la simulation

Le but général de la simulation est d'analyser quelques propriétés de notre protocole QS-OLSR, en particulier:

- **Le délai moyen de bout-en-bout:** c'est la moyenne des différences entre le temps d'arrivée d'un paquet de données à sa destination et le temps de son émission par le nœud source, pour les paquets bien reçus dans le réseaux.
- **La gigue:** représente la variation du délai d'acheminement des paquets entre la source et la destination. Elle est obtenue en calculant la différence entre le délai du paquet N et le délai du paquet $N+1$.
- **Le nombre moyen de relais multipoint:** ce paramètre détermine le nombre moyen de relais multipoints (MPR) sélectionnés dans le réseau.
- **le trafic de contrôle envoyé:** représente le nombre de paquets de contrôle utilisés par le protocole pour l'établissement et le maintien des routes entre les nœuds sources et les destinations du réseau. Cette métrique nous permet de connaître les coûts de sélection et de maintien des routes.
- **Le délai de découverte d'une route:** cette métrique représente le délai de découverte d'une route vers une destination spécifique pour tous les nœuds dans le réseau. Le temps de découverte de route à une destination spécifique est le temps que met une requête de découverte de route pour parcourir tous les nœuds intermédiaires jusqu'à atteindre la destination, plus le temps que met la réponse de route pour atteindre la source.

- **Le débit offert:** cette métrique représente le taux de transfert moyen pouvant être maintenu entre deux points terminaux. Cette grandeur peut être différente de la capacité du médium, elle exprime la vitesse à la quelle un volume de données est envoyé par unité de temps.

5.5.1 Métriques de la simulation

Les métriques sont utilisées pour déterminer la performance d'un protocole de routage. Ces métriques mesurent les performances du réseau en utilisant des unités standard. Pour mesurer les performances d'un protocole dans un réseau, un certain nombre de paramètres sont utilisés. Dans notre modèle, les métriques choisies sont illustrés dans la Figure 5.14. Le menu DES *Choose individual statistics*, nous permet de choisir les différentes métriques de la simulation à partir du menu *Global statistics*.

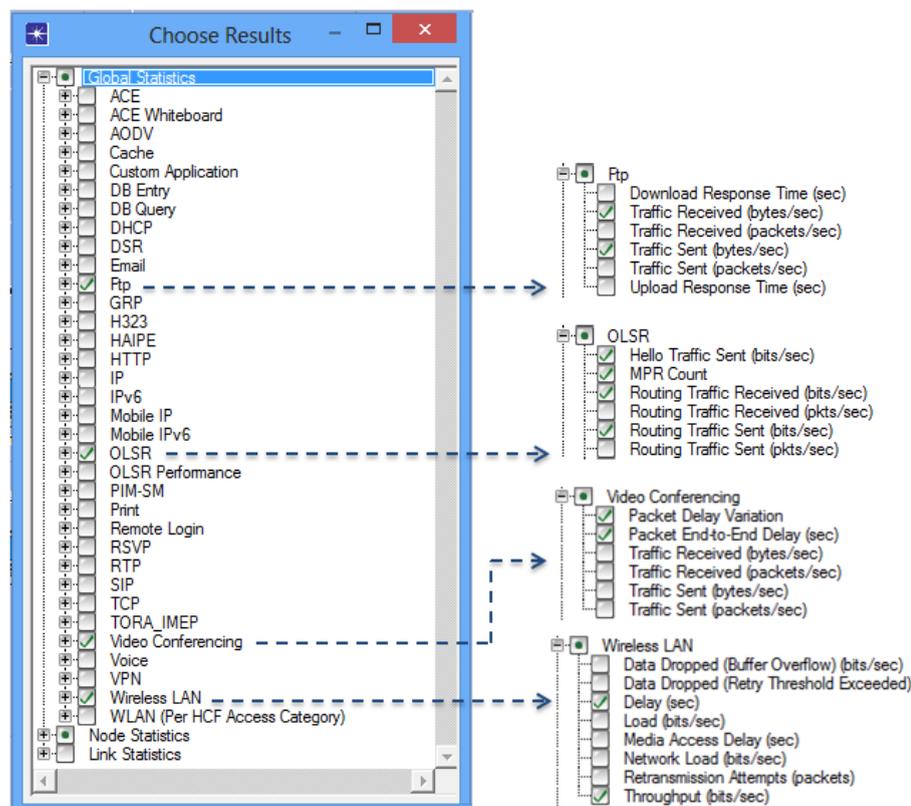


Figure 5.14: Sélection des valeurs statistiques.

5.6 Modèle de simulation utilisé

les paramètres généraux de l'environnement définis pour les simulations sont résumés dans le tableau (5.3) :

Paramètres	Valeurs
Nombre de nœud	20
Surface de simulation	1000m * 1000m
Temps de simulation	180–300s
Nombre de scénarios pour un même contexte	2
Taille d'un paquet de donnée	64 octet /exponentiel(1024)
Loi d'émission des paquets	Exponentiel (1)
Vitesse d'émission	4 pkts/s
Couche MAC	IEEE 802.11

Table 5.3: Les paramètres de l'environnement définis pour les simulations

La figure 5.15 montre un exemple de disposition des nœuds et l'état d'un scénario visualisé par OPNET Modeler 14.5 :

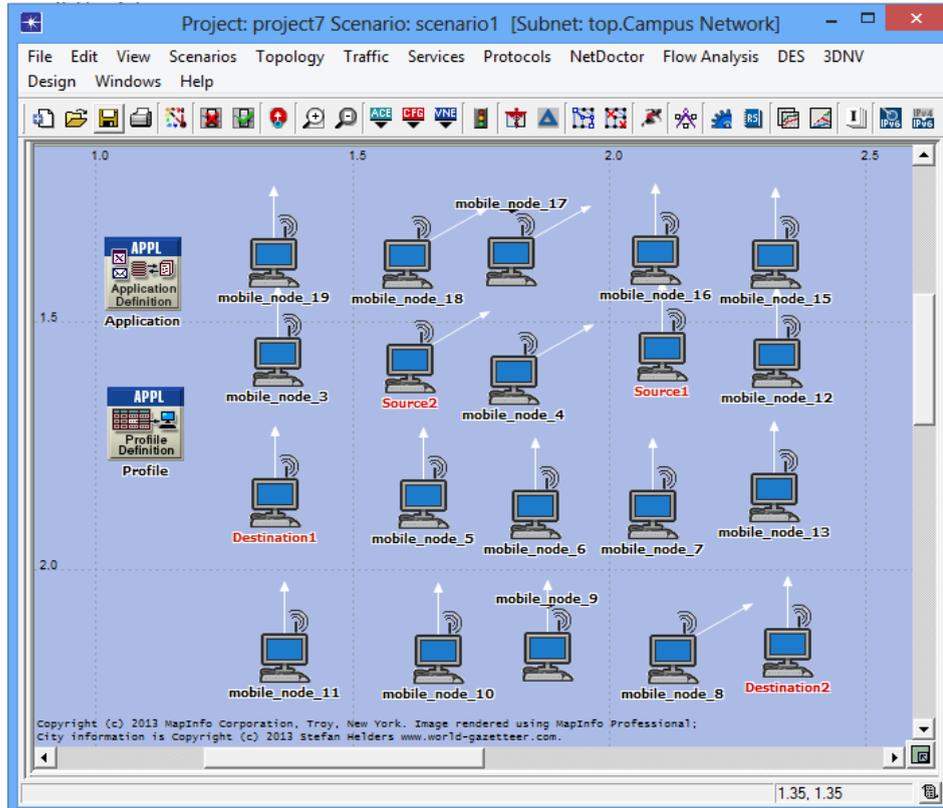


Figure 5.15: Exemple de disposition des nœuds.

Au début de chaque simulation, les paramètres du protocole OLSR de chaque nœud mobile doivent être configurés suivant le tableau illustré dans la figure 5.16:

OLSR Parameters	
Willingness	Willingness Default
Hello Interval (seconds)	2.0
TC Interval (seconds)	5.0
Neighbor Hold Time (seconds)	6.0
Topology Hold Time (seconds)	15.0
Duplicate Message Hold Time (sec...)	30.0
Addressing Mode	IPv4

Figure 5.16: Paramètres de simulation du protocole OLSR.

5.6.1 Scénarios de simulation

Dans notre simulation nous avons considéré deux types de scénarios : un scénario best-effort en utilisant l'application FTP et un scénario avec QoS en utilisant l'application vidéo conférence. Ces deux scénarios vont servir de base pour la simulation de OLSR natif et QS-OLSR. Les résultats obtenus par les deux protocoles seront alors comparés pour prouver les performances réalisées par notre protocole.

5.6.1.1 Scénario Best-effort (Application FTP)

Dans l'application d'échange de fichier FTP, le client accède au serveur pour télécharger ou sauvegarder des fichiers. Evaluer les deux protocoles sur un trafic typiquement best-effort permet de déterminer s'il est envisageable de remplacer le protocole initial par QS-OLSR sans entraîner une dégradation des performances. Cette application implique deux sources et deux destinations dans un réseau de 20 nœuds. La figure 5.17 résume les caractéristiques de cette application.

Attribute	Value
Command Mix (Get/Total)	50%
Inter-Request Time (seconds)	exponential (360)
File Size (bytes)	constant (50000)
Symbolic Server Name	FTP Server
Type of Service	Best Effort (0)
RSVP Parameters	None
Back-End Custom Application	Not Used

Figure 5.17: Caractéristique de l'application best-effort.

5.6.1.2 Scénario avec QoS (vidéo conférence)

Afin de démontrer le comportement des deux protocoles (QS-OLSR et OLSR natif) dans un contexte imposant des contraintes de QoS nous avons utilisé l'application *vidéoconférence* (figure 5.18) qui implique à la fois la voix et la vidéo. Les contraintes de qualité de service rigoureuses imposées par cette application constituent une bonne base pour évaluer l'amélioration qu'apporte QS-OLSR au routage à qualité de service. Une session vidéoconférence s'établit entre un nœud configuré comme source et un autre configuré comme destination lors du déploiement de l'application, cette application implique deux sources et deux destinations dans un réseau à 20 nœuds.

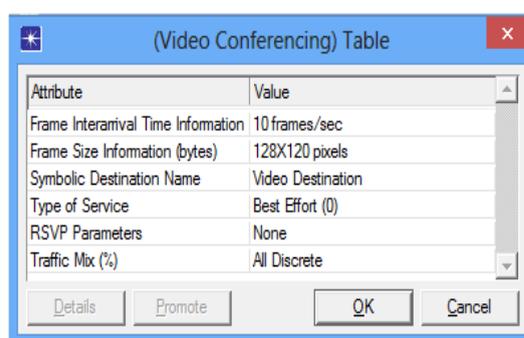


Figure 5.18: Caractéristique de la vidéo conférence.

5.7 Simulation: Résultats & interprétations

Dans cette section nous allons analyser les résultats des simulations opérées sur un réseau de 20 nœuds. En se basant sur les mêmes scénarios, nous avons effectué des simulations en utilisant QS-OLSR et OLSR standard. Les résultats obtenus sont illustrés par des graphes qui nous serviront de base pour comparer les versions des deux protocoles et mettre en exergue les performances en terme de QoS de notre proposition. Les résultats sont groupés en deux catégories : performance best effort et performance QoS.

5.7.1 Performances best-effort

Dans un premier temps, les évaluations vont servir à montrer que QS-OLSR peut être utilisé à la place du protocole OLSR natif pour acheminer le trafic des applications best-effort sans aucune dégradation des performances. Dans notre premier scénario nous avons utilisé l'application FTP pour un trafic best-effort, Dans ce cas, le client accède au serveur pour télécharger ou sauvegarder des fichiers.

Dans ce qui suit nous allons observer les différents résultats obtenus avec QS-OLSR et les comparer avec ceux obtenus avec OLSR natif.

- **Nombre de relais multipoints**

La figure 5.19, réunit les résultats obtenus pour la métrique du nombre de relais multipoints sélectionnés par notre protocole QS-OLSR et OLSR natif.

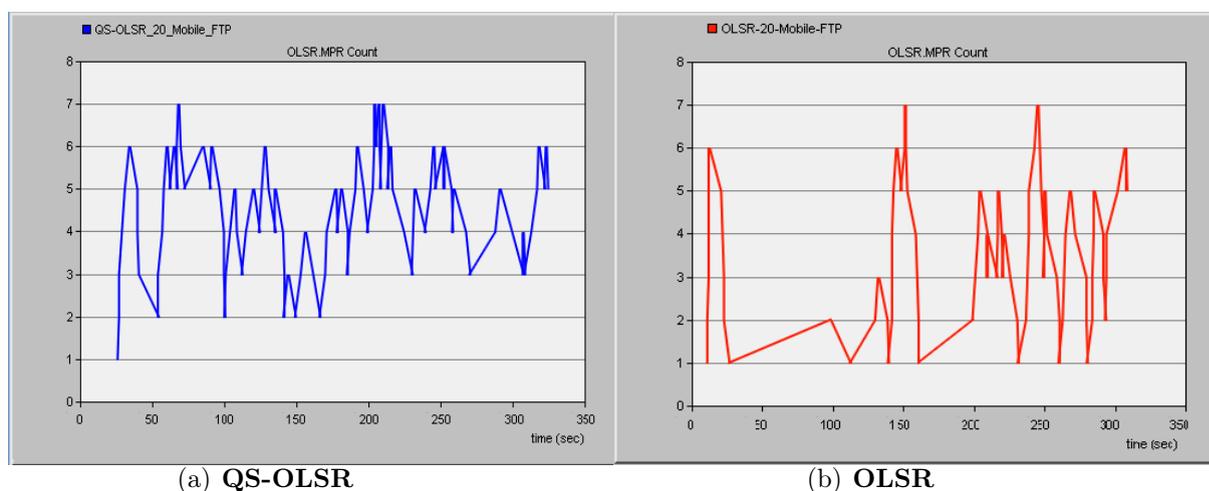


Figure 5.19: Nombre de MPR sélectionné par (a) et (b).

D'après les résultats de la figure 5.19, nous observons une légère augmentation du nombre de relais multipoints calculés par notre protocole en comparaison avec ceux calculé par le protocole OLSR natif. Cette augmentation est amplement justifiée par le fait que notre protocole sélectionne les MPR en fonction de leurs qualité de service (Bande passante, délai) et non en nombre de sauts tel que c'est fait par OLSR natif. Cette augmentation doit, par ailleurs, rester raisonnable de manière à ne pas perdre en terme d'optimisation de la diffusion.

- **Trafic de contrôle envoyé**

La figure 5.20, montre graphiquement les résultats obtenus par le trafic de contrôle envoyé et généré par les deux protocoles OLSR et QS-OLSR avec le même modèle au cours du temps de simulation.

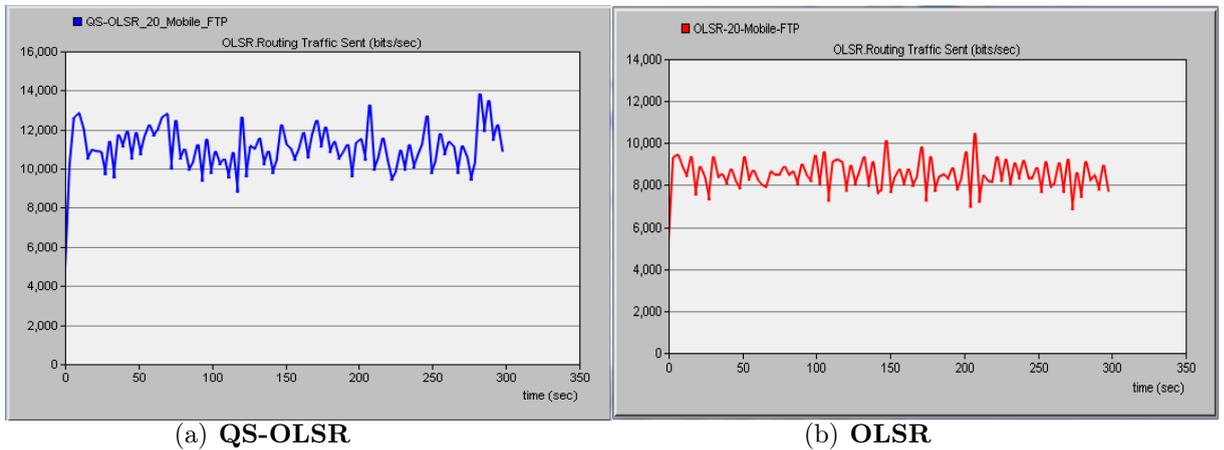


Figure 5.20: Trafic de contrôle envoyé par (a) et (b).

D’après les résultats obtenus dans la figures 5.20, nous observons la encore que notre protocole QS-OLSR introduit un trafic supplémentaire en comparaison avec le protocole OLSR natif, or ce trafic supplémentaire est nécessaire pour la dissémination des informations liées aux paramètres de la qualité de service via les messages Hello et TC émis dans le MANET. Mais malgré l’importance du trafic additionnel généré par QS-OLSR, nous allons voir dans ce qui suit qu’il parvient à optimiser l’utilisation des ressources et à offrir un débit globalement plus élevé que celui obtenu avec OLSR standard.

- Délai globale de découverte de routes

Les résultats présentés dans la figure 5.21 (a) et (b) montre les résultats obtenus pour cette métrique par QS-OLSR et OLSR natif respectivement.

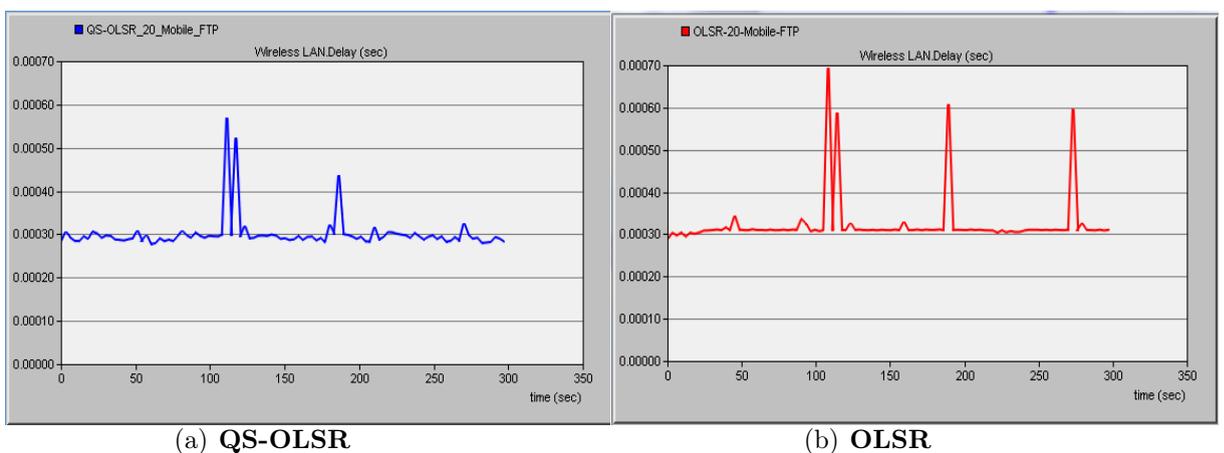


Figure 5.21: Délai globale de découverte de routes généré par (a) et (b) .

D'après les résultats de la figure 5.21, nous remarquons que QS-OLSR offre une meilleure performance en terme de délai globale de découverte de routes, en effet avec QS-OLSR, le délai de découverte est nettement réduit comparé à celui généré par OLSR natif. Ceci s'explique par le fait que notre protocole choisit les routes avec un délai minimal en cas d'égalité de bande passante.

- **Débit globale offert**

La figure 5.22 (a) et (b) montre les résultats obtenus pour cette métrique par QS-OLSR et OLSR natif respectivement.

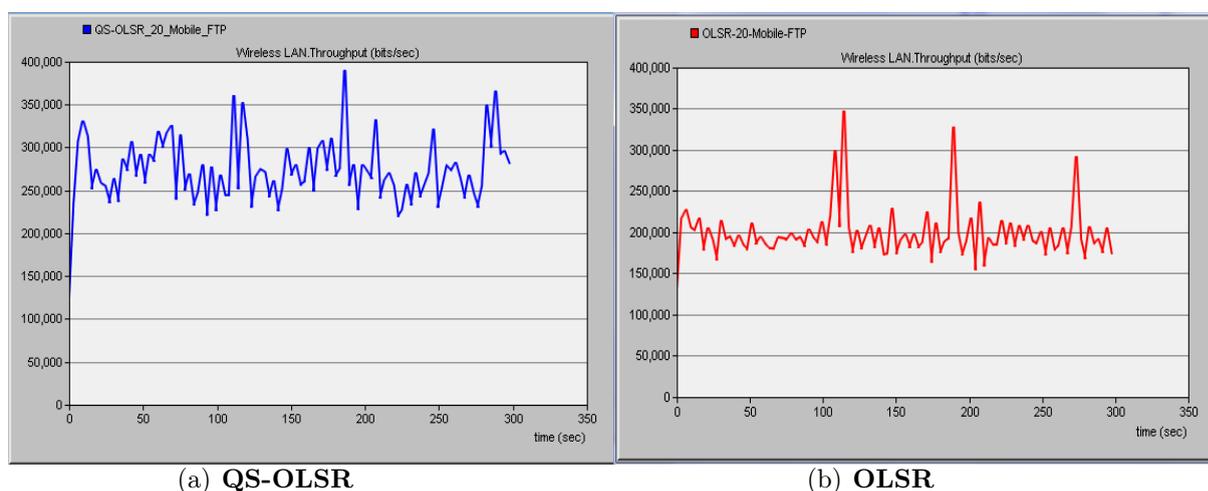


Figure 5.22: Débit globale offert par (a) et (b) .

D'après les graphiques de la figure 5.22, nous déduisons que notre protocole surpasse le protocole OLSR natif en terme de performance liée au débit globale offert. Les graphiques montrent clairement que le débit est nettement plus grand.

Dans le cas de QS-OLSR nous déduisons que malgré le trafic de contrôle supplémentaire induit par notre protocole, celui-ci améliore réellement les performances du MANET en terme de délai et de débit.

- **Trafic FTP envoyé et reçu**

Les figures 5.23 et 5.24, représentent les résultats obtenus respectivement pour le trafic FTP envoyé (*FTP traffic sent*) et reçu (*FTP traffic received*) pour les deux protocoles OLSR et QS-OLSR en cours de temps de la simulation.

-Trafic FTP envoyé

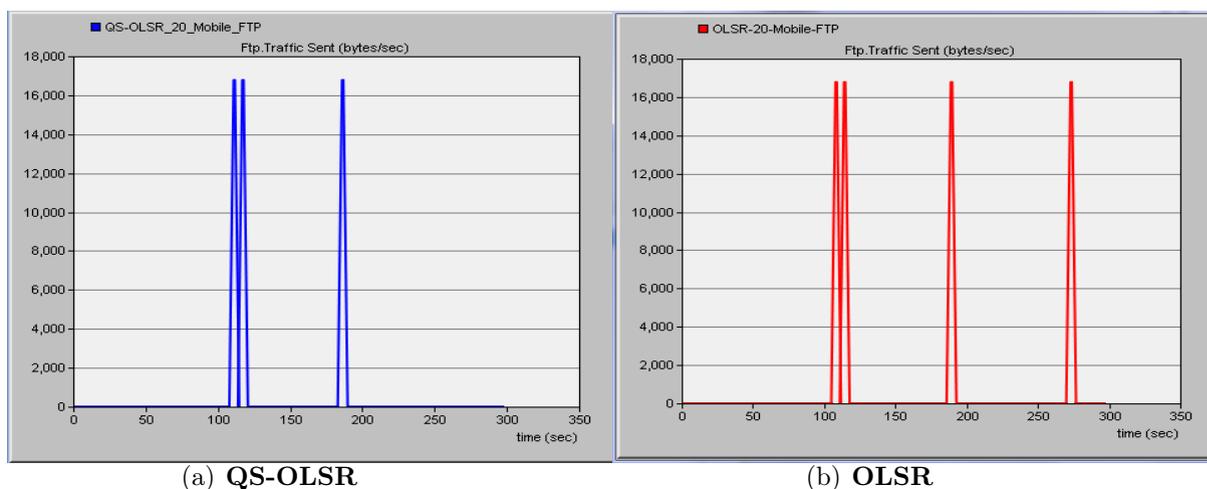


Figure 5.23: Trafic FTP envoyé par (a) et (b).

-Trafic FTP reçu

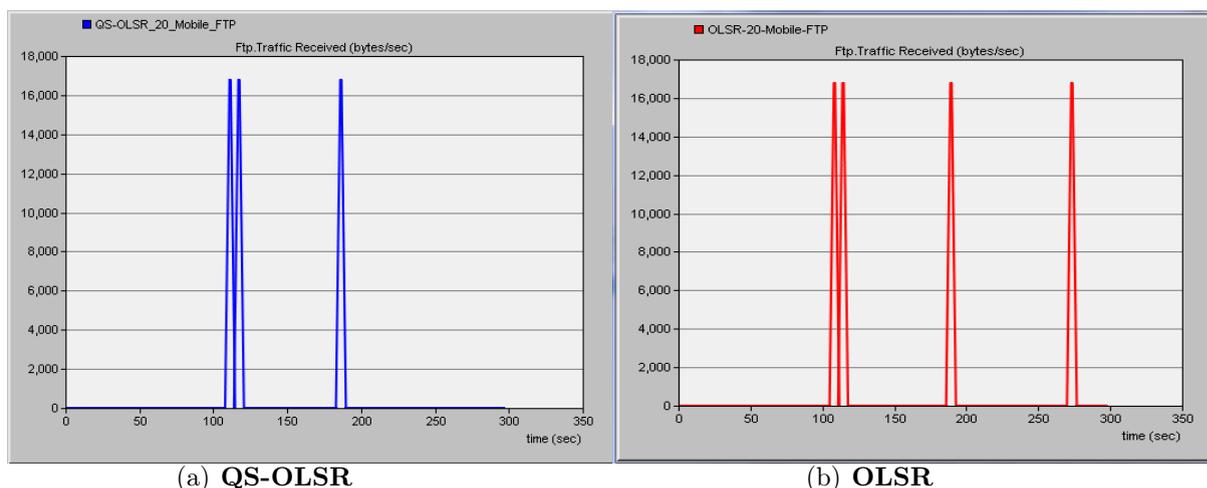


Figure 5.24: Trafic FTP reçu par (a) et (b).

Les figures 5.23 et 5.24 concernent les transferts réalisés par FTP dans un scénario best-effort, elles montrent clairement que QS-OLSR fournit un meilleur transfert pour les applications best-effort par rapport à OLSR natif.

Les résultats obtenus dans cette section établissent que QS-OLSR permet d'améliorer le taux de réception pour le trafic issu d'applications fonctionnant en mode best-effort. En effet l'amélioration obtenue pour ce mode permet d'envisager de remplacer le protocole dans ce genre de trafic par notre version.

5.7.2 Performances QoS (application vidéoconférence)

Cette section présente les résultats obtenus lors des évaluations des performances QoS sur l'application vidéoconférence dans un réseau MANET à 20 nœuds. Les figures 5.25 et 5.26 montrent que QS-OLSR propose des routes avec une meilleure qualité.

- **Délai globale de découverte de routes**

Pour le même scénario, nous obtenons les résultats présentés par la figure 5.25 (a) et (b) qui représente le délai global de découverte des routes généré par QS-OLSR et OLSR natif respectivement. Ces graphiques montrent clairement que QS-OLSR réduit sensiblement le délai de découverte comparé à OLSR natif.

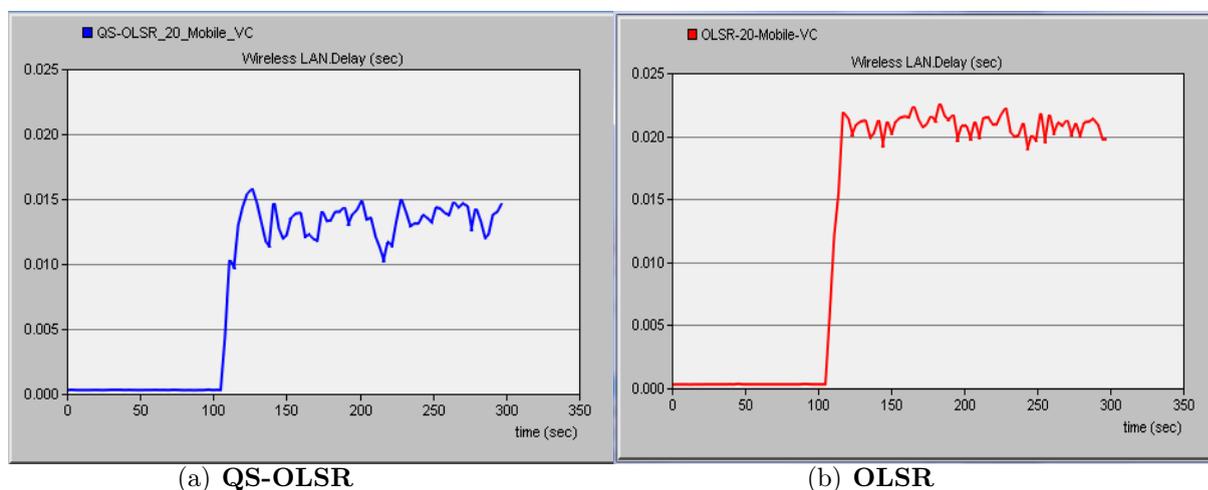


Figure 5.25: Délai globale de découverte de routes généré par (a) et (b) .

- **Débit globale offert**

la figure 5.26 (a) et (b) représente le débit offert par le protocoles OLSR et QS-OLSR respectivement au cours de temps de simulation en utilisant l'application de la vidéoconférence.

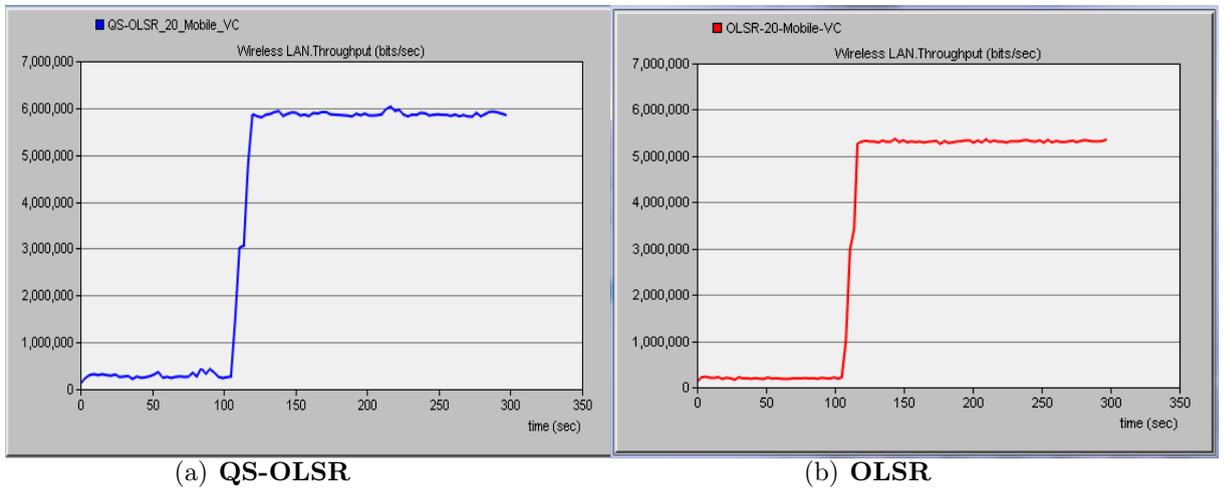


Figure 5.26: Débit globale offert par (a) et (b).

Nous remarquons encore une fois qu’avec QS-OLSR, le débit est meilleur. Les Figures 5.25 et 5.26 concernant le délai et le débit obtenus pour l’application de vidéoconférence montrent clairement que QS-OLSR offre de meilleures performances qu’OLSR natif dans les réseaux nécessitant la QOS, en terme de délai et de débit.

- **Délai de bout en bout**

La figure 5.27 (a) et (b) montre les résultats obtenus concernant la métrique délai de bout en bout par les deux protocoles de routage dans tout le réseau au cours du temps de simulation et avec le même modèle de simulation précédent.

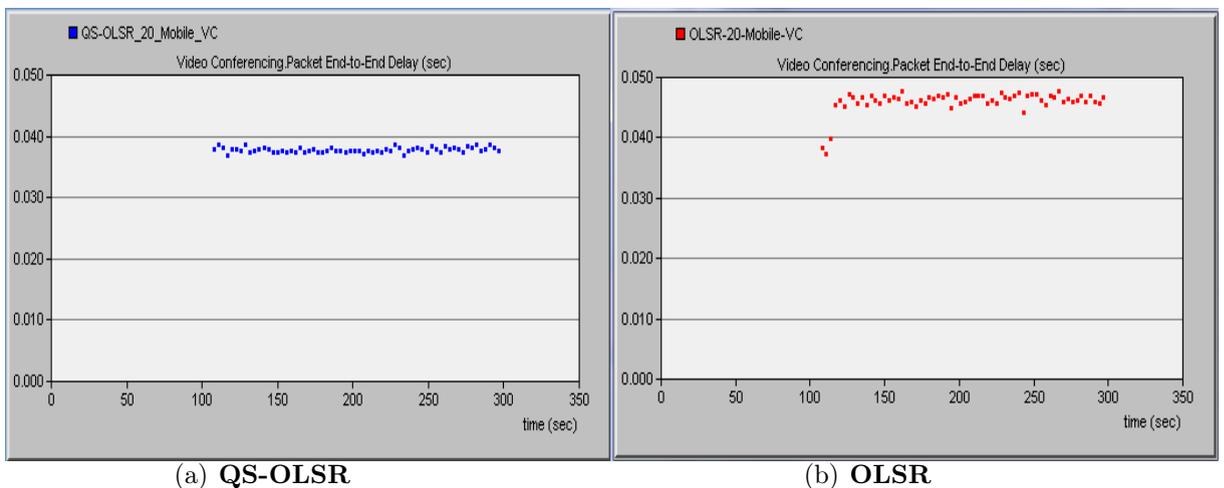


Figure 5.27: Délai de bout en bout pour la vidéoconférence généré par (a) et (b).

D'après les résultats de la figure 5.27, nous constatons que le délai moyen de bout en bout obtenu par le protocole OLSR natif est plus important que celui de notre protocole QS-OLSR. Cela s'explique par le fait que OLSR ne dispose d'aucune garantie pour le délai pendant la transmission. Par contre notre protocole améliore le délai, cela est justifié par le fait que ce dernier choisi les routes ayant un délai minimum sur les liens qui les forment.

- **Variation du délai (gigue)**

La figure 5.28 (a) et (b), représente l'évolution de la gigue au cours du temps de simulation pour les deux protocoles QS-OLSR et OLSR respectivement.

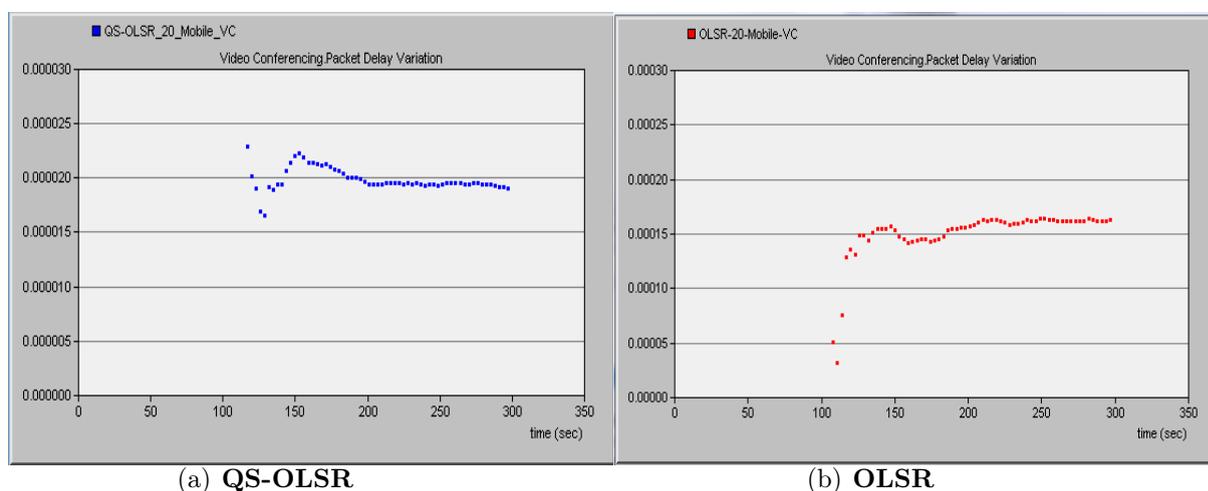


Figure 5.28: Variation du délai vidéo conférence (gigue).

Ces résultats sont obtenus en autorisant simultanément deux sessions de vidéo-conférence dans le réseau de 20 nœuds. Pour notre protocole, le choix de la route est soumis à la contrainte de la bande passante et de délai par conséquent, la gigue obtenu est acceptable pour une qualité moyenne dans les résultats obtenus avec un trafic de vidéo conférence, nous observons des gains en terme de délai de bout en bout (Figure 5.28), ainsi les giges représentent également les contraintes de QoS spécifiées.

5.8 Conclusion

Après avoir implémenté la solution proposée en utilisant le simulateur OPNET Modeler, nous avons présenté une mise en œuvre des mécanismes que nous avons

proposés pour la qualité de service dans le protocole OLSR. Les évaluations de ce protocole montrent qu'il introduit un trafic supplémentaire par rapport au trafic généré par OLSR natif mais qui reste amplement justifiée. L'étude de performance QoS a par ailleurs montré que notre version du protocole a surpassé la version standard d'OLSR en améliorant le délai de découverte, le délai de bout en bout, le débit globale ainsi que le trafic d'envoi et de réception. Le taux de réception et le délai obtenus dans le cadre des applications best-effort permettent d'établir qu'il peut avantageusement remplacer le protocole OLSR natif pour ce type d'applications.

Les résultats montrent qu'il peut également supporter l'acheminement d'un trafic nécessitant la QOS mieux qu'OLSR natif. Nous avons montré la capacité du protocole proposé à obtenir de meilleures routes, et à pouvoir ainsi assurer un délai de bout en bout et un taux de réception notamment meilleurs que ceux obtenus avec OLSR natif.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le réseau mobile ad hoc (MANET) consiste en un ensemble de nœuds autonomes, auto-organisables et auto-opérationnels. MANET est caractérisé par des liens fragiles, des liens avec moins de bande passante, des nœuds avec des contraintes d'énergie, des nœuds avec moins de capacité mémoire et de puissance de traitement que dans les réseaux filaires. Malgré toutes ces contraintes, il a plusieurs avantages et de multiples domaines d'applications. Ses applications spécifiques sont différentes de celles des réseaux fixes, et parfois même impossibles à réaliser avec ces derniers. En outre et vu la popularité croissante des applications multimédias déployées dans les MANETs, le thème sur la qualité de service dans ces réseaux est devenu un sujet de grand Intérêt et incontournable. Plusieurs solutions de routage [102] ont été proposées pour ces réseaux mais aucune d'entre elles ne paraît satisfaire la diversité des exigences de QoS dans ces réseaux.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons étudié le problème de routage avec qualité de service dans les réseaux mobile ad hoc. L'idée fondamentale a été de concevoir et d'analyser un protocole de routage avec QoS qui peut survenir aux exigences des applications temps réels, multimédias. Notre choix s'est porté sur le protocole proactif OLSR que nous avons décidé d'étendre avec une QoS en terme de bande passante et de délai.

Après avoir détaillé un état de l'art sur les réseaux sans fil (notamment les MANETs) et les différents protocoles dédiés aux MANETs, nous avons abordé le sujet sur la qualité de service dans ces réseaux. Nous avons alors identifié les différents paramètres de la QoS tels la bande passante, le délai de bout en bout, la gigue et le taux de perte de paquets, qui définissent la qualité de service d'un réseau ad hoc et sur lesquels il faut agir afin de garantir un support de QoS. Nous avons aussi étudié les différentes catégories de solutions de qualité de service dans MANET, soient : les modèles de la QoS, la signalisation de QoS, la différenciation des services

et enfin le routage avec qualité de service. Ainsi nous avons opté pour le routage avec qualité de service (QoS) et définir notre objectif qui consiste à proposer une extension pour améliorer la qualité de service en termes de bande passante et du délai dans le protocole OLSR.

Notre contribution n'est autre qu'une suggestion d'une solution basée sur un protocole de routage classique OLSR. Cette extension a été baptisée protocole QS-OLSR. Chaque nœud mesure les métriques de QoS (bande passante, délai) sur les liens vers ses voisins directs. Ces informations sont échangées localement afin de calculer un ensemble optimisé de nœuds relais. Cet ensemble permet par la suite à chaque nœud d'acquérir la topologie du réseau sous forme d'un graphe pondéré partiel et de calculer des routes optimales selon la demande des flux. Ceci est l'essence de notre algorithme de sélection des nœuds relais.

Par la suite, nous avons implémenté notre protocole sous OPNET Modeler 14.5 en réutilisant le code source du protocole OLSR. Les résultats obtenus montrent que QS-OLSR offre une amélioration considérable des performances du réseau en terme de délai de bout en bout, de gigue et de débit de transmission comparativement à OLSR natif. Nous pouvons conclure que malgré les quantités importantes de trafics de contrôle générés, ce protocole constitue une bonne solution pour le support de la qualité de service.

Bien que cette solution apporte une contribution dans les réseaux Ad hoc, plus particulièrement au routage avec qualité de service, de nombreuses perspectives peuvent être tracées :

- Améliorer notre solution en tenant compte d'autres paramètres de qualité de service comme : la probabilité de réception P et le Willingness W qui est une métrique par défaut dans OLSR;
- Songer également à surveiller la garantie de qualité de service sur les routes actives en envoyant des messages d'erreur suite à la dégradation de la QoS sur ces routes;
- Evaluer notre protocole par rapport à d'autres métriques telles que la consommation en énergie, la mobilité, d'une part, et par rapport à d'autres scénarios d'autre part.

Bibliographie

- [1] Carlos de Morais Cordeiro, Dharma P.agrawal, "*Mobile ad hoc network*", OBR Research Center for Distributed and Moblie Computing, ECECS University of CinCinnati, OH 45221-0030-USA, 2002.
- [2] Lemainque Fabrice, "Tout sur les réseaux sans fil", DUNOD, 2009.
- [3] Pujolle Guy, "Cours Réseaux et Télécoms", EYROLLES, 3eme édition, 2008.
- [4] Conchon Emmanuel, "Définition et mise en œuvre d'une solution d'émulation de réseaux sans fil", thèse doctorat, Université de Toulouse, 2006.
- [5] D.G.Frédéric, "WIFI l'essentiel qu'il faut savoir ...", Extraits de sources diverses récoltées en 2003.
- [6] Laouiti Anis, "Unicast et multicast dans les réseaux ad hoc sans fil", thèse de doctorat, Université de Versailles, 2002.
- [7] Ahizoune Ahmed, "Un protocole de diffusion des messages dans les réseaux véhiculaires", thèse de doctorat, Université de Montréal, 2011.
- [8] Djahel Sofiane, "Le routage OLSR et l'attaque du trou noir: Analyse et détection", GRAIN, 2007.
- [9] Maouchi Houari, "Routage avec Qualité de Service dans AODV ", mémoire d'ingénieur, Université de Tizi-Ouzou, 2009.
- [10] Espes David, "Protocoles de routage réactifs pour l'optimisation de bande passante et la garantie de délai dans les réseaux ad hoc mobiles", thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [11] Rizkallah Karim, "Contrôle des réseaux Ad hoc", Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Libanaise, 2001.

- [12] Hauspie Michaël, "Contributions à l'étude des gestionnaires de services distribués dans les réseaux ad hoc", thèse de doctorat, Université de Lille, 2005.
- [13] Dhoutaut Dominique, "Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc: la simulation à l'expérimentation", thèse de doctorat, Université de Lyon, 2003.
- [14] Chaudet Claude, "Autour de la réservation de bande passante dans les réseaux ad hoc", thèse de doctorat, Université de Lyon, 2004.
- [15] Brahma Mohamed, "Etude de la QoS dans les Réseaux Ad hoc: Intégration du Concept de l'Ingénierie du Trafic", thèse de doctorat, Université de HAUTE ALSACE, 2006.
- [16] ANS/IEEE std 802.11, "Part 11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications -Higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band*", 2000.
- [17] Aurelien Géron, "Wifi déploiement et sécurité", DUNOD, 2006.
- [18] Patrick Sondi Obawang, "Le Routage à Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc", thèse de doctorat, Université de Lille, 2011.
- [19] M.Gwendal Le Grand, "Qualité de service dans des environnements Internet mobile", thèse de doctorat, Université Paris VI, 2001.
- [20] Aît-Salem Boussad, "Sécurisation des Réseaux Ad hoc: Systèmes de Confiance et de Détection de Répliques", thèse de doctorat, Université de Limoges, 2011.
- [21] Ouididi Kamal, "Routage et Qualité de Service dans les réseaux sans fil spontanés", thèse de doctorat, Université Mohammed V-Souissi, 2010.
- [22] Frikha Mounir, "Réseaux ad hoc: routage, qualité de service et optimisation", Lavoisier, 2010.
- [23] Van der Meerschen Jérôme, "Hybridation entre les modes ad hoc et infrastructure dans les réseaux de type WiFi", mémoire d'ingénieur, université Libre de Bruxelles, 2006.
- [24] Van Den Bossche Adrien, "Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles", thèse de doctorat, Université de Toulouse II, 2007.

- [25] S. Corson, J. Macker, "*Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*", Request for Comments 2501, IETF, January 1999.
- [26] Meraihi Rabah, "Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc", thèse de doctorat, France, 2005.
- [27] Mahul Antoine, "Apprentissage de la qualité de service dans les réseaux multiservices: applications au routage optimal sous contraintes", thèse de doctorat, université Blaise Pascal - Clermont - Ferrand II, 2005.
- [28] RISC: Réseaux Hétérogènes intelligents pour situation de CRISE, "Etat de l'art sur les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc", 2008.
- [29] Jaddi Farid, "CSR: une extension hiérarchique adaptative du protocole de routage ad hoc DSR", thèse de doctorat, INP de Toulouse, 2006.
- [30] J. Carsique, N. Daujeard, A. Lallemand, and R. Ladjadj. "Le routage dans les réseaux mobiles Ad hoc", 2003.
- [31] Guy Pujolle, "Les Réseaux", Eyrolles, 2011.
- [32] Jean-Marc Percher et Bernard Jouga, "Détection d'intrusions dans les réseaux ad hoc", Ecole Supérieure d'Electronique de l'Ouest (ESEO) France, 2004.
- [33] Prasant Mohapatra, Srikanth V. Krishnamurthy, "Ad hoc networks Technologies and Protocols", Springer, 2005.
- [34] T. Clausen, P. Jacquet, "*Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*", RFC n°3626, IETF, 2003.
- [35] Tsu-Wei Chen, Mario Gerla, "*Global State Routing: A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks*", Proceeding IEEE ICC98, 1998.
- [36] P. Sondi, D. Gantsou, S. Lecomte, "*Design guidelines for quality of service support in Optimized Link State Routing-based mobile ad hoc networks*", 2012.
- [37] Guangyu Pei, Mario Gerla and Tsu-Wei Chen, "*Fisheye state routing in Mobile Ad Hoc networks*", In Proceeding of the 2000 ICDCs Workshops, Taiwan, 2000.
- [38] Supid Misra, Isaac Woungang and Subhas Chandra, "*Guide to Wireless Ad Hoc Network*", Springer, 2009.

- [39] C.C. Chiang, H-K Wu, Winston Liu, and Mario Gerla. "*Routing in clustered multihop mobile wireless networks with fading channel*", Proceedings of IEEE SICON, 1998.
- [40] Sandipvijay, Sharma, S.C. Parmanand, Santhosh Kumar, "*Research Reviews of IEEE 802.11 Wireless Ad-hoc Networks*", Proceedings of International Journal of Trends in Engineering, 2009.
- [41] Vincent D.Parka and M. Scott Corsonb, "*A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks*", USA University of Maryland, 1997
- [42] P.Sinha, R.Sivakumar, and V. Bharghavan, "*CEDAR : a core extraction distributed ad hoc routing algorithm*", 1999.
- [43] V.D.Park and M.S Corson,"*Temporally ordered routing algorithm (TORA)*", IETF, 1999.
- [44] R.L.Chunhung and L. Jain-Shing, "*Qos routing in ad hoc wireless networks*", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999.
- [45] C.Toh,"*A novel distributed routing protocol to support ad-hoc mobile computing*", IEEE 15th Annual International Phoenix Conf, 1996.
- [46] C-K.Toh , "*Associativity-Based Routing for Ad-Hoc Mobile Networks*",1997 .
- [47] R.Dube, C.D. Rais, K.Y.Wang and S. K. Tripathi, "*Signal stability-based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks*", IEEE Personal Communications, 1997.
- [48] Haas, Z.J. and Pearlman, "*The Zone Routing Protocol: A Hybrid Framework for Routing in Ad Hoc Networks*,"Perkins, 2000.
- [49] Y.B. Ko and N.H. Vaidya, "*Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks*", 2000.
- [50] Priyanka Goyal, Vinti Parmar Rahul Rishi, "*MANET : Vulnerabilities, Challenges, Attacks, Application*", International Journal of Computational Engineering & Management, 2011.
- [51] S. Basagni, I.Chlamtac, V. R.Syrotiuk and B. A. Woodward. "*A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)*", USA, 1998.

- [52] B. Karp, H. T. Kung, "*GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks*". In ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), USA, 2000.
- [53] M.Jiang, J.Li and Y. C. Tay, "*Cluster Based Routing Protocol (CBRP)* ", IETF, 1999.
- [54] M. Joa-Ng, I.-T. Lu, "A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications 17, 1999.
- [55] Samuel Pierre, "Réseaux et systèmes informatiques mobiles: Fondements, architectures et applications", Presses internationales Polytechnique, 2011.
- [56] Amir Qayyum, Laurent Viennot, and Anis Laouiti, "*Multipoint relaying : An efficient technique for flooding in mobile wireless networks.*" Technical Report Research Report RR-3898, INRIA, 2000.
- [57] Houda Labiod, "Réseaux mobiles ad hoc et réseaux de capteurs sans fil", Lavoisier, 2006.
- [58] Nidhi S. Kulkarni,Balusubramanian Raman And Indra Gupta, "On Demand Routing Protocols For Mobile Ad Hoc Networks-A Review",IEEE International Advance Computing Conference,2009.
- [59] Khaldoun Al Agha, "Réseau sans fil et mobiles", Lavoisier, 2004.
- [60] C. Hedrick , "Routing information protocol", RFC 1058, 1988.
- [61] E.W Dijkstra, "A note on two problems in connection with graphs", Numerische Mathematik, 1959.
- [62] D.A. Johnson, Y.C. Hu and D. A. Maltz, "*The Dynamic Source Routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for ipv4* ", RFC 4728, Internet Engineering Task Force (IETF), 2007.
- [63] E.Crawley, R.Nair, B.Rajagopalan, and H. Sandick, "*A Framework for QoS based Routing in the Internet*", IETF RFC 2386, 1998.
- [64] Leila Toumi, "Algorithmes et mécanismes pour la qualité de service dans les réseaux hétérogènes", Thèse de doctorat, INP de Grenoble, 2002.

- [65] Jean-Pierre CHANET, "Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri- environnementaux", Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2007.
- [66] Rabah Meraihi, Gwendal Le Grand, Samir Tohmé, Michel Riguidel, "Gestion multicouches de la qualité de service dans un réseau ad hoc à coeur stable", École Nationale Supérieure des Télécommunications, 2011.
- [67] K.Wu and J.Harms, "*QoS Support in Mobile Ad Hoc Networks*". Crossing Boundariesthe GSA Journal of University of Alberta, 2001.
- [68] Claude Chaudet, "Qualité de service et réseaux ad hoc - un état de l'art", rapport de recherche, institut national de recherche en informatique en automatique NRIA, 2011.
- [69] U.Stéphane P.MINET, "Réseaux mobile ad hoc et réseaux de capteurs sans fil", 2006.
- [70] R.Braden et al, "RFC : 2205 *Resource ReSerVation Protocol (RSVP)*", IETF, 1997.
- [71] S.Blake, D.Black, M.Carlson, E.Davies, Z.Wang, and W.Weiss, "RFC : 2475 *An Architecture for Differentiated Services*" , IETF, 1998.
- [72] H.Xiao, K.G.Seah, A.Lo, and K.C.Chua, "*A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks*", 2000.
- [73] H.Xiao, K.C. Chua and K.G. Seah, "*Quality of Service Models for Ad-Hoc Wireless Network*", 2002.
- [74] Gahng-Seop Ahn, Andrew T.Campbell, Andras Veres and Li-Hsiang Sun, "*SWAN: Service Differentiation in Stateless Wireless Ad Hoc Networks*", Proc. IEEE INFOCOM', 2002.
- [75] K.Chen, S.H.Shah, and K. Nahrstedt, "*Cross Layer Design for Data Accessibility in Mobile Ad Hoc Networks*", Journal on Wireless Communications, 2002.
- [76] Ian and C.Castelluccia, "Dierentiation mechanisms for IEEE 802.11. In to appear in IEEE Infocom 2001.
- [77] Yang xiao, frank hli, hui chen, "Handbook of security and networks", world scientific, 2011.

- [78] IEEE 802.11 WG, *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications : Medium Access Control (MAC) Enhancement for Quality of Service (QoS IEEE 802.11e/Draft 3.0, 2002.*
- [79] SANJEEV GANGWAR, DR.SAURABH PAL and DR.KRISHAN KUMAR, "*Mobile Ad Hoc Networks:A Comparative Study of QoS Routing Protocols*", University Jaunpur, IJCSET Vol 2, Issue 1,771-775, 2012.
- [80] S.B. Lee, A.Gahng-Seop, X.Zhang, and A.T. Campbell, "*INSIGNIA : An IP-Based Quality of Service Framework for Mobile Ad Hoc Networks*", Journal of Parallel and Distributed Computing (Academic Press) , Special issue on Wireless and Mobile Computing and Communications, 2000.
- [81] D.Thomson M.Mirhakkak ,N.Schult, "*Dynamic quality-of-service for mobile ad hoc networks*".In IEEE Mobile hoc 2000,
- [82] Ying Ge Kunz, T.Lamont, "*Quality of service routing in ad-hoc networks using OLSR*", Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, (HICSS'03).
- [83] H. Badis and K. A.Agha, "*Quality of service for ad hoc Optimized Link State Routing Protocol (QOLSR)*", Internet draft draft-badis-manetqolsr- 01.txt:IETF MANET working group, 2005.
- [84] P.Minet D.Q.Nguyen,"*QoS support and OLSR routing in a mobile ad hoc network*",ICN06,Mauritius, 2007.
- [85] A.Munaretto , H.Badis ,K.Al Agha G.Pujolle, "*QOLSR: Routage avec QoS dans OLSR*", International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks, 2003.
- [86] Ingelrest, F. and Simplot-Ryl, "*Maximizing the Probability of Delivery of Multipoint Relay Broadcast Protocol in Wireless Ad Hoc Networks with a Realistic Physical Layer*", 2006.
- [87] Fadila Khadar, Nathalie Mitton, David Simplot-Ryl, "*Towards an efficient QoS based selection of neighbors in QOLSR*", INRIA Lille, 2010.
- [88] S.chen and K.Nahrstedt, "*Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks*", IEEE journal selected Areas in Communications, 1999.

- [89] Q.Xue and A.Ganz, "*Ad hoc qos on-demand routing (aqor) in mobile ad hoc network*", ACADEMIC PRESS : journal of parallel and distributed computing, 2003.
- [90] Global mobile information systems simulation library (glomosim): <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [91] Qualnet: <http://www.qualnet.com->
- [92] Network simulator 3: <http://www.isi.edu./nslam/ns/>.
- [93] Opnet Modeler: <http://www.opnet.com>.
- [94] H.Badis and K.Al Agha, "*QoS for ad hoc networking based on multiple-metrics :Bandwith and delay*", In IFIP MWCN'03 : Mobile and Wireless Communications Networks , Singapore, 2003.
- [95] Samarth H.Shah, Kai Chen, and Klara Nahrstedt, "*Available bandwith estimation in IEEE 802.11 based wireless networks*". In proceeding of the first ISMA/-CAIDA Bandwith estimation workshop , 2003.
- [96] Martins, "On a multicriteria shortest path problem", European Journal of Operational Research, 1984.
- [97] Ogier, R.Templin, and M.Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", IETF, 2004.
- [98] A.Roy and M.Chandra, "Extensions to OSPF to Support Mobile Ad Hoc Networking", IETF, 2010.
- [99] <http://www.omnetpp.org/>
- [100] Labraoui Nabila, "La Sécurité dans les réseaux sans fil ad hoc", thèse de doctorat, Université de TLEMCEM , 2012.
- [101] A.Boomarani Malany, V.R.Sarma Dhulipala, and RM.Chandrasekaran, "Throughput and Delay Comparison of MANET Routing Protocols", Int. J. Open Problems Compt, 2013.
- [102] Arti Gupta, Manish Pradhan, "A Comparative Study of Current Routing Protocol in Wireless Ad-Hoc Network" , Department of ECE, Mahakal Institute of Technology Ujjain, Vol. 2 Issue 5, May 2013.

RÉSUMÉ

L'approvisionnement en qualité de Service (QoS) est l'une des problématiques majeures posées dans les réseaux mobiles ad hoc (MANETs). Une bonne solution de QoS est généralement construite à base de plusieurs briques dont le routage avec QoS. Plusieurs travaux portant sur l'étude de la QoS dans les protocoles de routage ont été menés et ont montré que cette tâche n'est pas triviale car la topologie du réseau mobile ad-hoc change constamment et l'information d'état disponible pour le routage demeure imprécise.

Dans le cadre de ce travail nous proposons une version QoS du protocole de routage proactif OLSR (*Optimized Link State Protocol*). Notre solution baptisée QS-OLSR (QoS for OLSR) a comme brique principale un algorithme qui permet de sélectionner le meilleur ensemble MPR (MultiPoints Relays) satisfaisant les critères d'une bonne qualité de service en terme de bande passante maximale et de délai minimal. Les résultats de simulation obtenus sous OPNET Modeler ciblant des applications à fortes contraintes de QoS ont montré une amélioration significative des performances notamment de délai de bout en bout, de débit et de gigue, comparé à la version originale d'OLSR.

Mots clés : réseaux ad hoc, protocole de routage, QoS, OLSR, simulateur OPNET.

ABSTRACT

Quality of Service (QoS) provisioning is one of the major problems in mobile ad hoc networks (MANETs). A good solution of QoS is generally built upon several blocks including QoS routing. In the few last years, substantial research effort has gone into the development of QoS routing algorithms for MANETs and have shown that this task is not trivial because the network topology constantly changes and state information available for routing remains imprecise.

In this work, we propose a QoS version of the pro-active Ad-Hoc routing protocol OLSR (*Optimized Link State Protocol*). Our solution called QS-OLSR (QoS for OLSR) has as a main brick an algorithm which allows to select the best set MPR (multipoint relays) that meets the criteria of a good quality of service in terms of maximum bandwidth and minimum delay. The simulation results in OPNET Modeler targeting applications with high QoS constraints have shown a significant performance improvement in terms of end to end delay, throughput and jitter compared to the original version of OLSR.

Keywords: Ad hoc networks, routing protocols, QoS, OLSR, OPNET simulator.