

Thèse de Doctorat

Le Routage à Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc

Présentée par

Patrick SONDI OBWANG

Pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis**

Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur Université Lille Nord-de-France-072

Spécialité : Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains

Discipline : Informatique

Soutenue publiquement le 10 décembre 2010 devant le jury :

| | |
|--------------------|--|
| Rapporteur | Pascale Minet, INRIA Rocquencourt |
| Rapporteur | Amir Qayyum, M. A. Jinnah University |
| Examineur | Anis Laouiti, Télécom SudParis |
| Examineur | Sidi-Mohamed Senouci, Université de Bourgogne |
| Président du jury | Eric Gressier-Soudan, Conservatoire National des Arts et Métiers |
| Directeur de thèse | Sylvain Lecomte, Université de Valenciennes |
| Co-Encadrant | Dhavy Gantsou, Université de Valenciennes |

The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not 'Eureka!', but 'That is funny ...'

[Isaac Asimov]

Résumé de la thèse

Conçus à l'origine pour le trafic best-effort, les réseaux mobiles ad hoc (MANET) sont de plus en plus amenés à acheminer le trafic des applications imposant des contraintes de qualité de service (QoS).

Les solutions pour le routage à QoS dans les MANET ont généralement été proposées comme des extensions optionnelles des protocoles best-effort. Par exemple, la symétrie des liaisons y est encore définie au sens de la connectivité, alors que les liaisons ne sont évidemment pas symétriques au sens de la QoS. De plus, dans les solutions proposées dans le cadre du protocole proactif Optimized Link State Routing (OLSR), l'effort algorithmique pour la QoS se fait souvent au détriment de l'optimisation de la diffusion qui est pourtant une des activités les plus consommatrices de ressources.

L'approche proposée dans cette thèse consiste à intégrer les aspects liés à la QoS dans la représentation des MANET dès la conception du protocole de routage. Prenant pour cible le protocole OLSR, nous proposons une formulation du problème de la sélection des relais multipoints (MPR) sous forme de programme mathématique pour permettre à la fois l'optimisation de la diffusion et la prise en compte des paramètres de la qualité de service. Une heuristique proposée pour réaliser la sélection des MPR indépendamment du nombre et du type de métriques est également proposée. L'heuristique appliquée à quatre métriques ainsi que les autres mécanismes proposés sont ensuite intégrés dans OLSR. Les évaluations ciblant une application à fortes contraintes de qualité de service en établissent les performances aussi bien en environnement ouvert qu'en agglomération.

Mots clés : réseaux mobiles ad hoc, qualité de service, OLSR, routage multicritère.

Remerciements

Je remercie Dieu.

Je remercie mon père Barthelemy SONDI à qui je dédie ce travail. Philosophe, Théologien et Ingénieur Agronome, il a été, à la fois en tant que modèle de curiosité scientifique, de travailleur assidu et d'incitateur à aller toujours plus loin, le guide qui m'a conduit inexorablement à cette thèse de doctorat.

Je remercie ma mère, Marie-Thérèse Mubwanga, Biochimiste, qui m'a toujours rappelé que le plus important dans la vie d'un homme est de vivre heureux et en bonne santé ; et n'a eu de cesse de m'inviter à me ménager.

Je remercie Roger et Chantal Larribe, ainsi que Nicole Gareau pour leurs contributions décisives à la réalisation de mon projet de reprise d'études.

Je remercie Sylvain Lecomte et Dhavy Gantsou, respectivement pour la Direction et l'encadrement scientifique de mes travaux au cours de cette thèse. Je remercie particulièrement Dhavy Gantsou pour sa perspicacité et la confiance qu'il m'a témoignée en me proposant des projets sur les réseaux mobiles ad hoc dès mes premières années d'études à l'Université de Valenciennes. Ce travail de préparation dans la durée a eu un impact majeur sur l'aboutissement de ma thèse.

Je remercie tous les membres de mon jury pour l'intérêt qu'ils témoignent à mon travail par la lecture de mon manuscrit et leur présence à la soutenance publique de ma thèse de doctorat. Je tiens à remercier particulièrement Pascale Minet et Amir Qayyum qui ont accepté de rapporter mon mémoire. Leurs questions ainsi que leurs remarques ont beaucoup contribué à son amélioration.

Je remercie enfin ma compagne, mon fils, ma famille, mes ami(e)s, mes collègues, en particulier J-M Raviart et P. Dos Santos, ainsi que toutes les personnes qui ont eu un jour une pensée, une parole ou une action en faveur de ma thèse.

Veillez tous et toutes trouver dans l'accomplissement de cette thèse le témoignage de ma gratitude pour votre confiance et votre soutien.

TABLE DES MATIERES

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | INTRODUCTION..... | 8 |
| 1.1 | MOTIVATIONS ET BUT DE LA THESE..... | 9 |
| 1.2 | CONTEXTE DE LA THESE..... | 12 |
| 1.3 | ORGANISATION DU MEMOIRE..... | 15 |
| 2 | ETAT DE L'ART..... | 18 |
| 2.1 | LES METRIQUES DANS LES MANET..... | 18 |
| 2.1.1 | <i>Les métriques caractérisant les stations.....</i> | 20 |
| 2.1.2 | <i>Les métriques caractérisant les liaisons.....</i> | 21 |
| 2.2 | MODELISATION ET REPRESENTATION DES MANET..... | 22 |
| 2.2.1 | <i>Le modèle Unit Disk Graph (UDG).....</i> | 22 |
| 2.2.2 | <i>Les modèles non géométriques aléatoires.....</i> | 23 |
| 2.2.3 | <i>Le modèle LogNormal Shadowing (LNS).....</i> | 23 |
| 2.3 | STRUCTURATION DU MANET AVEC LES RELAIS MULTIPOINT (MPR)..... | 24 |
| 2.3.1 | <i>Notations.....</i> | 26 |
| 2.3.2 | <i>Les MPR pour optimiser la diffusion.....</i> | 26 |
| 2.3.3 | <i>Les MPR pour la qualité de service.....</i> | 31 |
| 2.4 | CALCUL DE ROUTES A QUALITE DE SERVICE..... | 33 |
| 3 | REPRESENTATION DES MANET POUR LA QUALITE DE SERVICE..... | 36 |
| 3.1 | REPRESENTATION GNERIQUE DES MANET POUR LA QOS..... | 36 |
| 3.1.1 | <i>Formalisation de la notion de métrique.....</i> | 37 |
| 3.1.2 | <i>Représentation générique d'un MANET caractérisé par n métriques.....</i> | 40 |
| 3.1.3 | <i>Concepts et opérations dans $G(V,E,M)$.....</i> | 42 |
| 3.2 | FORMULATIONS DU PROBLEME DE LA SELECTION DES MPR..... | 46 |
| 3.2.1 | <i>Les MPR pour optimiser la diffusion.....</i> | 46 |
| 3.2.2 | <i>Les MPR pour la qualité de service.....</i> | 49 |
| 3.3 | CONCLUSION..... | 51 |
| 4 | UNE HEURISTIQUE GNERIQUE POUR LA SELECTION MULTICRITERE DES MPR..... | 53 |
| 4.1 | UNE HEURISTIQUE GNERIQUE POUR LA SELECTION DES MPR..... | 53 |
| 4.1.1 | <i>Objectifs, contraintes et options.....</i> | 53 |
| 4.1.2 | <i>Présentation de l'heuristique QH.....</i> | 55 |
| 4.1.3 | <i>Contribution à l'amélioration de MAXP.....</i> | 60 |
| 4.2 | EVALUATION DE L'HEURISTIQUE QH..... | 62 |
| 4.2.1 | <i>Le contexte des évaluations.....</i> | 63 |
| 4.2.2 | <i>Evaluation comparative de QH.....</i> | 67 |
| 4.2.3 | <i>Evaluation de l'efficacité de QH.....</i> | 78 |
| 4.3 | CONCLUSION..... | 81 |
| 5 | UNE VERSION DU PROTOCOLE OLSR POUR LA QUALITE DE SERVICE..... | 83 |
| 5.1 | UNE VERSION D'OLSR POUR LA QUALITE DE SERVICE Q-OLSR..... | 83 |
| 5.1.1 | <i>Fonctionnement d'OLSR natif.....</i> | 83 |
| 5.1.2 | <i>Estimation et dissémination des valeurs des métriques.....</i> | 87 |
| 5.1.3 | <i>Sélection des relais multipoints (MPR).....</i> | 95 |
| 5.1.4 | <i>Calcul des routes.....</i> | 95 |
| 5.2 | EVALUATION DE Q-OLSR..... | 96 |
| 5.2.1 | <i>L'Outil de l'évaluation: l'OPNET Modeler.....</i> | 96 |
| 5.2.2 | <i>Implémentation de Q-OLSR dans OPNET.....</i> | 100 |
| 5.2.3 | <i>Scenarios utilisés pour les évaluations.....</i> | 103 |
| 5.2.4 | <i>Résultats des évaluations.....</i> | 107 |
| 5.3 | CONCLUSION..... | 130 |
| 6 | CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... | 133 |
| 6.1 | CONCLUSION..... | 133 |
| 6.2 | PERSPECTIVES..... | 136 |
| 7 | PUBLICATIONS | |
| 8 | BIBLIOGRAPHIE | |

TABLE DES FIGURES

| | | |
|-------------|--|-----|
| FIGURE 1.1 | EXEMPLE D'UN RESEAU AD HOC | 8 |
| FIGURE 3.1 | ILLUSTRATION DES VARIABLES POUR LA SELECTION DES MPR | 48 |
| FIGURE 4.1 | EXEMPLE POUR DECRIRE L'ETAPE 1 DE QH | 58 |
| FIGURE 4.2 | EXEMPLE POUR DECRIRE LES ETAPES 2 ET 3 DE QH | 59 |
| FIGURE 4.3 | EXEMPLE POUR ILLUSTRER L'AMELIORATION DE MAXP | 61 |
| FIGURE 4.4 | 400 NŒUDS SUIVANT UNE DISTRIBUTION UNIFORME | 65 |
| FIGURE 4.5 | 400 NŒUDS SUIVANT UNE DISTRIBUTION NORMALE | 66 |
| FIGURE 4.6 | 400 NŒUDS SUIVANT UNE DISTRIBUTION STATIONNAIRE | 66 |
| FIGURE 4.7 | TEMPS D'EXECUTION POUR MOINS DE 1000 NŒUDS | 69 |
| FIGURE 4.8 | TEMPS D'EXECUTION DES ALGORITHMES LENTS | 70 |
| FIGURE 4.9 | TEMPS D'EXECUTION DES ALGORITHMES RAPIDES | 70 |
| FIGURE 4.10 | NOMBRE DE MPR SELECTIONNES | 71 |
| FIGURE 4.11 | NOMBRE DE MPR SELECTIONNES PAR SG ET QH | 72 |
| FIGURE 4.12 | DEBIT MOYEN OBTENU PAR LES MPR SELECTIONNES | 73 |
| FIGURE 4.13 | DELAJ MOYEN OBTENU PAR LES MPR SELECTIONNES | 73 |
| FIGURE 4.14 | PROBABILITE DE RECEPTION CORRECTE DES MESSAGES | 74 |
| FIGURE 4.15 | PROBABILITE DE RECEPTION CORRECTE POUR DISTRIBUTION NORMALE | 75 |
| FIGURE 4.16 | WILLINGNESS MOYEN AVEC LES MPR SELECTIONNES | 76 |
| FIGURE 5.1 | ENVOI DE MESSAGES HELLO | 84 |
| FIGURE 5.2 | FORMAT D'UN MESSAGE HELLO DANS OLSR NATIF | 84 |
| FIGURE 5.3 | FORMAT D'UN MESSAGE TC DANS OLSR NATIF | 86 |
| FIGURE 5.4 | FORMAT D'UN MESSAGE HELLO POUR LA QoS | 88 |
| FIGURE 5.5 | EXEMPLE POUR ILLUSTRER LE PROBLEME DES VALEURS LOCALES | 89 |
| FIGURE 5.6 | FORMAT D'UN MESSAGE TC POUR LA QoS | 91 |
| FIGURE 5.7 | EXEMPLE POUR ILLUSTRER LE PROBLEME DE LA SYMETRIE | 92 |
| FIGURE 5.8 | INTERFACE DU MODELER 16.0 ET MODULE D'AIDE A L'UTILISATEUR | 97 |
| FIGURE 5.9 | ASSISTANT DE DEPLOIEMENT DE RESEAU SANS-FIL | 98 |
| FIGURE 5.10 | DEFINITION DE TOPOLOGIE ET DE TRAJECTOIRES PERSONNALISEES | 98 |
| FIGURE 5.11 | CONFIGURATION ET DEPLOIEMENT D'APPLICATIONS | 99 |
| FIGURE 5.12 | SELECTION DES VALEURS STATISTIQUES | 100 |
| FIGURE 5.13 | CONFIGURATION DE LA SIMULATION | 100 |
| FIGURE 5.14 | MODELE D'UNE STATION DE TRAVAIL EQUIPEE D'UNE CARTE SANS FIL | 101 |
| FIGURE 5.15 | PROCESS MODEL DU PROTOCOLE OLSR DANS OPNET | 102 |
| FIGURE 5.16 | ENVIRONNEMENT OUVERT ET ENVIRONNEMENT URBAIN | 104 |
| FIGURE 5.17 | CARACTERISTIQUES DES TRAFICS BEST-EFFORT | 105 |
| FIGURE 5.18 | CARACTERISTIQUES DES TRAFICS BEST-EFFORT | 107 |
| FIGURE 5.19 | CARACTERISTIQUES DE L'APPLICATION VIDEOCONFERENCE | 107 |
| FIGURE 5.20 | APPLICATION DE SUIVI DE TROUPES EN TEMPS REEL | 108 |
| FIGURE 5.21 | TRAFIC POUR 50 NŒUDS FIXES EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 109 |
| FIGURE 5.22 | TRAFIC POUR 50 PIETONS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 110 |
| FIGURE 5.23 | TRAFIC POUR 50 VEHICULES EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 110 |
| FIGURE 5.24 | TRAFIC POUR 100 NŒUDS FIXES EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 111 |
| FIGURE 5.25 | TRAFIC POUR 100 PIETONS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 111 |
| FIGURE 5.26 | TRAFIC POUR 100 VEHICULES EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 111 |
| FIGURE 5.27 | TRAFIC MOYEN POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 112 |
| FIGURE 5.28 | TRAFIC MOYEN POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 112 |
| FIGURE 5.29 | DEBIT MOYEN POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 113 |
| FIGURE 5.30 | DEBIT MOYEN POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 113 |
| FIGURE 5.31 | DELAJ MOYEN POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 113 |
| FIGURE 5.32 | DELAJ MOYEN POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 114 |
| FIGURE 5.33 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 115 |
| FIGURE 5.34 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 115 |
| FIGURE 5.35 | TAUX DE RECEPTION DES MAILS POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 115 |
| FIGURE 5.36 | TAUX DE RECEPTION DES MAILS POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 116 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| FIGURE 5.37 | DELAI MOYEN DE TELECHARGEMENT DE MAILS DU SERVEUR POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 116 |
| FIGURE 5.38 | DELAI MOYEN DE TELECHARGEMENT DE MAILS DU SERVEUR POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 117 |
| FIGURE 5.39 | DELAI MOYEN D'ENVOI DE MAILS VERS LE SERVEUR POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 117 |
| FIGURE 5.40 | DELAI MOYEN D'ENVOI DE MAILS VERS LE SERVEUR POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 117 |
| FIGURE 5.41 | TAUX DE RECEPTION DE FICHIERS PAR FTP POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 118 |
| FIGURE 5.42 | TAUX DE RECEPTION DE FICHIERS PAR FTP POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 118 |
| FIGURE 5.43 | DELAI MOYEN DE TELECHARGEMENT DE FICHIERS DU SERVEUR POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 119 |
| FIGURE 5.44 | DELAI MOYEN DE TELECHARGEMENT DE FICHIERS DU SERVEUR POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 119 |
| FIGURE 5.45 | DELAI MOYEN D'ENVOI DE FICHIERS DU SERVEUR POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 120 |
| FIGURE 5.46 | DELAI MOYEN D'ENVOI DE FICHIERS DU SERVEUR POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 120 |
| FIGURE 5.47 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 121 |
| FIGURE 5.48 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 121 |
| FIGURE 5.49 | RECEPTION POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN..... | 122 |
| FIGURE 5.50 | RECEPTION POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN..... | 122 |
| FIGURE 5.51 | DELAI MOYEN POUR LA VIDEOCONFERENCE POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 122 |
| FIGURE 5.52 | DELAI MOYEN POUR LA VIDEOCONFERENCE POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN | 123 |
| FIGURE 5.53 | GIGUE MOYENNE POUR LA VIDEOCONFERENCE POUR 50 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN..... | 123 |
| FIGURE 5.54 | GIGUE MOYENNE POUR LA VIDEOCONFERENCE POUR 100 NOEUDS EN MILIEU A) OUVERT ET B) URBAIN..... | 123 |
| FIGURE 5.55 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN ET TAUX DE RECEPTION POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 50 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (1 SAUT) | 124 |
| FIGURE 5.56 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN ET TAUX DE RECEPTION POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 100 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (1 SAUT)..... | 125 |
| FIGURE 5.57 | GIGUE ET DELAI POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 50 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (1 SAUT) | 125 |
| FIGURE 5.58 | GIGUE ET DELAI POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 100 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (1 SAUT) | 125 |
| FIGURE 5.59 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN ET TAUX DE RECEPTION POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 50 NCEUDS EN MILIEU URBAIN (2 SAUTS) | 126 |
| FIGURE 5.60 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN ET TAUX DE RECEPTION POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 100 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (2 SAUTS)..... | 126 |
| FIGURE 5.61 | GIGUE ET DELAI POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 50 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (2 SAUTS)..... | 126 |
| FIGURE 5.62 | GIGUE ET DELAI POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 100 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (2 SAUTS)..... | 127 |
| FIGURE 5.63 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN ET TAUX DE RECEPTION POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 50 NCEUDS EN MILIEU URBAIN (3 SAUTS) | 127 |
| FIGURE 5.64 | NOMBRE DE SAUTS MOYEN ET TAUX DE RECEPTION POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 100 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (3 SAUTS)..... | 128 |
| FIGURE 5.65 | GIGUE ET DELAI POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 50 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (3 SAUTS)..... | 128 |
| FIGURE 5.66 | GIGUE ET DELAI POUR LA VIDEOCONFERENCE AVEC 100 NOEUDS EN MILIEU URBAIN (3 SAUTS)..... | 128 |
| FIGURE 5.67 | SCENARIO POUR LA TROISIEME SERIE D'EVALUATIONS | 129 |

1

Introduction

- 1.1 *Motivations et but de la thèse*
- 1.2 *Contexte de la thèse*
- 1.3 *Organisation du mémoire*

1 Introduction

Un réseau mobile ad hoc (MANET) [1] est formé d'équipements sans-fil et mobiles qui s'auto-organisent sans l'aide d'une quelconque infrastructure. Les MANET ont connu leurs débuts aux Etats-Unis autour des années 1970 dans le cadre du programme PRNET¹ de la DARPA². L'objectif initial était de disposer d'un réseau tactique sans-fil pour les militaires, susceptible d'être déployé rapidement à n'importe quel coin du globe sans s'appuyer sur aucune infrastructure fixe. L'absence de cette dernière pour coordonner le fonctionnement du réseau génère des problèmes complexes:

- les nœuds émettent périodiquement sur le même canal afin de s'annoncer, et ils écoutent sur ce même canal dans le but de découvrir leurs voisins. Dans un MANET, le canal de communication est une ressource partagée dont aucune instance centralisée n'assure la gestion. Comparativement aux réseaux sans-fil à infrastructure, les nœuds d'un MANET sont davantage sujets aux interférences, à des pertes de données, à des temps d'accès au médium plus long et ils disposent d'un débit réel très inférieur à celui observé dans les réseaux à infrastructure ;
- outre les déconnexions accidentelles dues à la portée limitée et à l'instabilité des liaisons sans-fil, les nœuds d'un MANET peuvent à tout moment quitter ou rejoindre le réseau. L'effet combiné de ces comportements et de la mobilité se traduit par de fréquents changements de topologie. Par conséquent, les nœuds d'un MANET doivent fréquemment redécouvrir leur voisinage et recalculer les routes. Il s'ensuit une consommation d'énergie assez importante pour des terminaux mobiles qui, en général, n'en disposent qu'en quantité limitée.

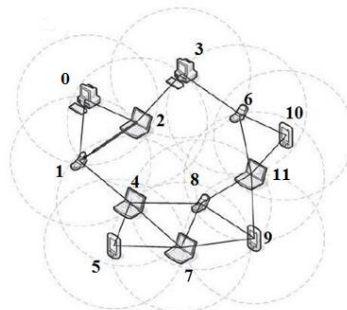


Figure 1.1 Exemple d'un réseau ad hoc

¹ Packet Radio Network

² Defense Advanced Research Projects Agency

La figure 1 illustre un réseau ad hoc formé de 12 nœuds. Le nœud 0 peut communiquer directement avec les nœuds 1 et 2. Pour atteindre les autres destinations, par exemple le nœud 11, il doit s'appuyer sur des nœuds intermédiaires qui vont relayer ses messages de proche en proche jusqu'à 11. Contrairement aux réseaux sans-fil à infrastructure où le maintien de la connectivité est assuré par des équipements spécifiques, dans les MANET chaque nœud doit calculer et maintenir les routes pour atteindre toutes les destinations. De plus, non seulement chaque nœud s'appuie sur des nœuds intermédiaires sur chaque route pour atteindre la destination visée, mais il doit également à son tour retransmettre le trafic de ses voisins.

1.1 Motivations et but de la thèse

Afin de résoudre la plupart de ces problèmes, les travaux de recherche sur les réseaux ad hoc se sont intensifiés dans les années 1980 et ont ouvert la voie à de nombreux domaines de recherche et d'application. L'émergence de ce domaine de recherche a conduit l'IETF³ à créer dans les années 1998/1999 le MANET Working Group pour assurer la standardisation des solutions basées sur la technologie IP⁴ pour les réseaux ad hoc, mobiles ou non. Une des fonctionnalités les importantes est le routage. Le routage est le mécanisme par lequel des routes sont sélectionnés 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 a donné des directives pour concevoir et évaluer des protocoles de routage adaptés aux réseaux mobiles ad hoc [1].

Parmi les nombreux protocoles de routage proposés, l'IETF n'en a standardisé que cinq comme RFC⁵, à savoir DSR (Dynamic Source Routing) [2], AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) [3], OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) [4], TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) [5] et OSPF-OR [6]. Tous ces protocoles de routage retenus pour les MANET fonctionnent en mode best-effort. Les flux des applications sont acheminés en fonction des ressources disponibles dans le réseau sans tenir compte des exigences des applications. Les MANET étant alors utilisés dans des domaines très spécialisés, les adaptations de ces protocoles en vue de répondre à des besoins spécifiques se sont fait au cas par cas. Un double événement est venu profondément modifier ce tableau. Le premier correspond à la prolifération d'équipements comportant une interface de

³ Internet Engineering Task Force

⁴ Internet Protocol

⁵ Request For Comment

communication sans fil et à l'apparition de nombreux réseaux sans fil grand public. Les cartes réseau sans fil équipent désormais des ordinateurs fixes ou portables, des téléphones mobiles ainsi que de nombreux autres petits objets spécialisés ou de la vie courante qui peuvent être localisés dans des bâtiments ou embarqués dans des avions, des véhicules ou des capteurs. Cela permet de mettre en place des réseaux spécialisés tels que des réseaux tactiques, des réseaux de véhicules (VANET⁶), des réseaux de capteurs (WSN⁷), mais aussi des réseaux grand public tels que les réseaux communautaires (OLSR-NG, Lille Sans fil, FON), des réseaux sur des campus ou sur les lieux de manifestations ponctuelles

Le second événement est l'arrivée sur Internet de nombreuses applications mettant en œuvre l'échange de la voix, de la vidéo, des images, de la messagerie instantanée et de toute autre combinaison de ces éléments. On comprend dès lors que la valeur ajoutée apportée par les données multimédia ait intéressé aussi bien les réseaux ad hoc tactiques que le grand public.

Depuis une dizaine d'années, des recherches sont menées activement pour offrir un support de la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc et ainsi permettre un déploiement adéquat d'applications multimédia. Des résultats de plusieurs travaux traitant de la qualité de service dans les MANET ont été proposés [7].

D'une part, dans la quasi-totalité de ces travaux, la démarche consiste à proposer des mécanismes permettant d'assurer l'acheminement de flux à qualité de service à travers le réseau mobile ad hoc. Mais les hypothèses considérées en termes de routage, notamment sur les liaisons, restent celles adoptées lors de la conception des protocoles best-effort. C'est ainsi par exemple que la plupart des protocoles de routage best-effort utilisent les liaisons symétriques pour construire des routes. Par conséquent, le MANET peut être représenté sous la forme d'un graphe non orienté et les routes qui existent dans un sens le sont également dans le sens inverse. Il est néanmoins difficile d'envisager que la qualité observée sur les liaisons lors d'une transmission survenant dans un sens soit identique à celle observée dans le sens inverse. Cette dernière remarque met en évidence la nécessité de nouvelles hypothèses et d'une nouvelle représentation des MANET lorsqu'on envisage d'offrir la qualité de service.

D'autre part, les problèmes critiques liés à la consommation des ressources dans les MANET dont l'énergie et la bande passante, notamment lors des diffusions de messages à travers le réseau, restent d'actualité. Les conséquences liées à ces problèmes ont inévitablement un impact sur la qualité de service.

⁶ Vehicular Ad Hoc Network

⁷ Wireless Sensor Networks

Les solutions proposées actuellement pour la qualité de service font abstraction de ces problèmes ou proposent des mécanismes pour la QoS en sus de ceux proposés pour les résoudre. Etant donné qu'aussi bien les problèmes précités que celui de la mise en œuvre de la qualité de service portent sur les ressources, il semble intéressant d'étudier dans quelle mesure ils pourraient être traités simultanément.

En considérant ces deux aspects, le but de cette thèse est d'étudier comment ces problèmes pourraient être pris en compte dans la conception des mécanismes permettant de garantir la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc lorsqu'on se limite au niveau du routage. Suivant la logique en couches du modèle OSI⁸, nous adoptons une abstraction du MANET du point de vue de la couche réseau (Niveau 3 du modèle OSI).

Bien que la tendance des travaux sur la qualité de service dans les MANET soit aux approches dites cross-layer [8][9] qui favorisent la coopération entre les mécanismes de QoS mis en œuvre au niveau des différentes couches, nous justifions notre démarche par la nécessité d'atteindre deux objectifs :

- le premier consiste à proposer des solutions pérennes pour le routage à qualité de service qui dépendent le moins possible des avancées technologiques rapides observées (IEEE802.11e [10], IEEE802.11p [11] et IEEE802.11n [12]) au niveau de la couche MAC sur laquelle s'appuient les protocoles de routage dédiés aux MANET ;
- le second, à concevoir des mécanismes de routage ayant une portée la plus générale possible. Par analogie avec les unités de programme génériques, ces mécanismes que l'on peut qualifier de génériques pourraient être utilisés dans des contextes différents pour des applications présentant des contraintes de QoS de nature différente.

Ces objectifs sont dictés par le besoin d'évoluer vers un protocole de routage reposant sur des mécanismes qui permettent de garantir la qualité de service quel que soit le contexte, et ce, indépendamment des architectures du niveau liaison sur lesquelles repose le fonctionnement des réseaux mobiles ad hoc.

⁸ Open Systems Interconnection

1.2 Contexte de la thèse

Notre étude ne se limitant qu'au niveau du routage, nous présentons succinctement les protocoles de routage proposés dans les MANET et dont une présentation détaillée est disponible dans [13] et [14]. Des différentes classifications qui existent, l'IETF en retient deux : les protocoles réactifs et les protocoles proactifs. Un troisième groupe dit des protocoles hybrides est souvent associé aux protocoles qui ont dans leur fonctionnement à la fois les caractéristiques des deux précédents.

Les protocoles réactifs calculent les routes à la demande. Ils ne maintiennent pas des informations sur la topologie du réseau. Lorsque la transmission échoue sur une route précédemment calculée, une nouvelle recherche est initiée en vue d'atteindre la destination. Les protocoles DSR, AODV et RDMAR [15] sont des exemples de protocoles réactifs.

Dans les protocoles proactifs, chaque nœud doit périodiquement mettre à jour sa table de routage pour disposer immédiatement d'une route valide lorsqu'il veut émettre vers une destination. Pour ce faire, chaque nœud maintient localement une connaissance de la vue partielle de la topologie qu'il met à jour périodiquement. TBRPF, OLSR, OSPF-OR, DSDV [16], FSR [17], DREAM [18] et BABEL [19] sont des exemples de protocoles proactifs.

Les protocoles hybrides tels que ZRP [20] et ToRA [21] définissent une zone locale limitée au voisinage à un certain nombre de sauts d'un nœud, et dans laquelle le routage se fait sur le modèle proactif. Pour toutes les destinations situées en dehors de cette zone, le nœud procède à une requête de route comme dans les protocoles réactifs en comptant sur le fait qu'un nœud ayant la destination dans sa zone locale disposera d'une route et la renverra rapidement.

Il existe également d'autres familles de protocoles, notamment les protocoles hiérarchiques tels que HSR [22] et VSR [23] ou les protocoles dits géographiques parce qu'ils utilisent l'information sur la position des nœuds tels que LAR [24], GPSR [25] et GRID [26]. Tous ces protocoles sont obtenus suite à des variations des mécanismes mis en œuvre dans les protocoles réactifs et proactifs.

Représentation des MANET

Indépendamment de la classe à laquelle appartient un protocole de routage, le concept mathématique qui convient le mieux pour représenter le réseau lors de sa conception est le graphe. En effet, les stations et les liaisons entre les stations sont respectivement représentées

par les nœuds et les arcs d'un graphe. Le MANET est représenté par un graphe $G(V, E)$ non orienté, où V est l'ensemble des noeuds et E l'ensemble des arcs. S'agissant de la mise en œuvre de la qualité de service dans les MANET, cette représentation soulève deux problèmes. D'une part, dans la plupart des travaux sur la qualité de service dans les MANET, les métriques considérées sont en général ajoutées comme des poids sur les nœuds ou les arcs. Une comparaison de différents travaux montre qu'il y a un grand nombre de métriques pouvant être prises en compte pour le routage dans les MANET. Certaines de ces métriques ne sont pas forcément liées à la qualité de service, nous les identifierons sous le terme de métriques annexes dans ce mémoire. C'est par exemple le cas pour les métriques liées à la consommation d'énergie. Ainsi, il peut s'avérer difficile de comparer de façon objective des travaux portant sur les mêmes métriques de qualité de service lorsqu'elles ne prennent pas en considération les mêmes métriques annexes. Il n'est pas envisageable d'imposer la prise en compte de toutes les métriques, mais une proposition serait plus lisible et plus facile à comparer à d'autres si toutes les métriques qu'elle prend en compte apparaissent clairement dans le graphe représentant le MANET.

D'autre part, la représentation des réseaux sous forme de graphe remonte aux réseaux filaires. Or, dans ces réseaux la question de la symétrie des liaisons ne se pose pas dans les mêmes termes que lorsqu'il s'agit des MANET. En général, les conditions déterminant l'existence, la connectivité et la qualité d'une liaison dépendent de la modélisation du réseau. Mais il existe plusieurs modélisations pour les réseaux mobiles ad hoc [27], et elles diffèrent dans la définition de ces conditions. Pourtant, ces concepts sont déterminants dans la conception des mécanismes de routage. Nous pensons qu'il est nécessaire de disposer d'une représentation des MANET qui soit suffisamment abstraite pour être applicable dans tous les cas, indépendamment de la modélisation sous-jacente considérée.

Optimisation de l'utilisation de ressources et qualité de service

Des propositions faites dans le cadre des réseaux mobiles ad hoc, celles concernant l'utilisation efficace des ressources sont les plus nombreuses. Le problème de la mise en œuvre de la qualité de service est lui-même en grande partie lié à un problème de disponibilité de ressources en quantité suffisantes pour assurer l'acheminement du trafic de certaines applications dans les conditions requises. Une première étape dans la résolution de ces problèmes consiste donc à optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

Dans un MANET, les nœuds se connectent au réseau, découvrent leurs voisins et calculent les routes vers les destinations qu'ils souhaitent atteindre. Ce processus commun à la quasi-totalité des protocoles de routage dans les MANET s'appuie en grande partie sur la diffusion des messages de contrôle. Cette diffusion est consommatrice de ressources, notamment la bande passante et par conséquent, le débit. Elle génère également des collisions et peut entraver l'acheminement adéquat du trafic des applications. Une étude détaillée des problèmes posés par la diffusion dans les MANET est proposée dans [28].

Dans le classement des opérations consommatrices d'énergie dans les MANET proposé dans [29], le broadcast arrive en troisième position pour une émission et en sixième position pour une réception sur un total de onze opérations. Mais si l'on considère qu'il est l'opération la plus fréquente et qu'une seule émission peut engendrer un très grand nombre de réceptions, elle est sans doute l'opération qui consomme le plus d'énergie. Plusieurs mécanismes sont mis en œuvre dans les différents protocoles de routage pour diminuer l'impact du broadcast sur la consommation des ressources [13][14]. Parce qu'en général ils ne maintiennent pas les informations sur la topologie du réseau, les protocoles réactifs ont une marge de manœuvre assez limitée dans l'optimisation de la diffusion.

Dans cette thèse, nous abordons le problème de la prise en compte des paramètres de qualité de service en même temps que celui de l'optimisation de la diffusion dans les protocoles proactifs. Nous optons pour la technique des relais multipoint (MPR) [30][31][32] utilisée notamment dans OLSR pour optimiser la diffusion. Cette technique consiste pour chaque nœud à sélectionner un nombre minimal de ses voisins à un saut, les relais multipoint (MPR), qui sont les seuls autorisés à retransmettre les messages de broadcast qu'il émet ou retransmet. Cet ensemble doit néanmoins assurer que le message de broadcast parvienne à tous les voisins à deux sauts de l'émetteur. La sélection des MPR consiste à résoudre une instance du problème de couverture d'ensembles (MSCP) [33] connu pour être NP-dur [34].

La plupart des applications déployées dans les MANET s'appuient sur le broadcast. De plus, dans OLSR les MPR jouent un rôle déterminant dans le calcul de routes étant donné qu'ils sont les seuls autorisés à diffuser les informations sur les liaisons qu'ils ont avec les nœuds qui les ont sélectionnés à travers tout le réseau. En d'autres termes, toutes les destinations situées à plus de deux sauts d'un nœud donné ne peuvent être connues que grâce aux messages TC (Topology Control) envoyés par leurs MPR. Pour une mise en œuvre efficace de la qualité de service, il est donc nécessaire que ces derniers soient également sélectionnés de manière à bénéficier des liaisons ayant les meilleures valeurs pour les métriques de qualité

de service. Les routes étant calculées proactivement et toutes les applications ne présentant pas de contraintes de QoS sur une seule et même métrique, les MPR doivent être sélectionnés sur la base de toutes les métriques pour lesquelles les différentes applications déployées dans le MANET spécifient des contraintes de QoS. En d'autres termes, la sélection des MPR en fonction des paramètres de la qualité de service est un cas particulier du problème de calcul de routes multicritères, connu pour être NP-complet dans la plupart des cas [35].

La complexité de chacun des problèmes explique peut-être le fait qu'aucune des propositions faites à ce jour pour la qualité de service dans OLSR ne traite véritablement l'ensemble des problèmes. Les travaux de Ge et al [36] ne considèrent qu'une seule métrique de qualité de service à la fois lors de la sélection des MPR. Les propositions de Badis et Al Agha [37] intègrent jusqu'à trois métriques, mais au prix d'une relaxation de la contrainte sur la minimisation du nombre de MPR. Nguyen et Minet [38] proposent de maintenir un ensemble de MPR minimal pour assurer l'optimisation de la diffusion et d'y adjoindre un second ensemble de MPR dédié à la QoS, sur lequel la contrainte de minimisation du nombre de MPR est relaxée. De plus, une seule métrique de QoS est considérée dans leur solution.

Contrairement à cette tendance à traiter séparément les deux problèmes, nous pensons que la mise en œuvre de la qualité de service sans le maintien d'un contrôle rigoureux sur la diffusion des messages peut être inefficace à terme à cause de la dissipation des ressources qu'occasionne cette dernière. Éviter le calcul de routes multicritères reviendrait à empêcher un déploiement efficace des applications ayant des exigences de qualité de service sur des métriques différentes ou sur plusieurs métriques à la fois. L'intérêt de notre approche réside dans le fait que nous proposons de traiter l'ensemble de ces problèmes simultanément sans lever les contraintes majeures sur chacun d'eux.

1.3 Organisation du mémoire

Afin de présenter les travaux menés durant cette thèse, nous avons choisi d'organiser la présentation de la suite de ce mémoire de la manière suivante :

- le chapitre 2 propose un état de l'art de la mise en œuvre la qualité de service au niveau du routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Une présentation des métriques considérées au niveau du routage dans les MANET, en particulier celles liées à la qualité de service, est proposée avant une revue succincte des modélisations les plus utilisées. La présentation des principaux algorithmes proposés pour la sélection des

MPR ainsi que les principales propositions pour le calcul de routes à qualité de service clôturent ce chapitre ;

- le chapitre 3 présente notre contribution à la représentation des MANET ainsi que les formulations mathématiques du problème de la sélection des MPR que nous proposons. En intégrant les paramètres de la QoS dans la phase de sélection des MPR, cette approche duale offre le double avantage :
 - d’optimiser la diffusion, ce qui est la raison d’être des relais multipoints ;
 - de sélectionner les MPR de telle sorte que les messages au départ ou à destination de ces derniers ne transitent que par des liaisons offrant les meilleures valeurs des paramètres de la qualité de service concernés.
- le chapitre 4 présente notre heuristique réalisant la sélection duale des MPR. Les évaluations de performances réalisées permettent de la situer comparativement aux heuristiques existantes ;
- le chapitre 5 montre comment les mécanismes proposés sont appliqués au protocole OLSR. Il présente aussi les résultats des différentes simulations réalisées pour l’évaluation des performances pour différents types de trafic dans les milieux ouverts et les agglomérations. Nous avons utilisé l’outil OPNET Modeler pour les simulations.
- le chapitre 6 conclut ce mémoire et présente les perspectives ouvertes par nos travaux.

2

Etat de l'art

- 2.1 *Les métriques dans les MANET*
 - 2.1.1 Les métriques caractérisant les stations
 - 2.1.2 Les métriques caractérisant les liaisons
- 2.2 *Modélisation et représentation des MANET*
 - 2.2.1 Le modèle Unit Disk Graph (UDG)
 - 2.2.2 Les modèles non géométriques aléatoires
 - 2.2.3 Le modèle LogNormal Shadowing (LNS)
- 2.3 *Structuration du MANET avec les relais multipoint (MPR)*
 - 2.3.1 Notations
 - 2.3.2 Les MPR pour optimiser la diffusion
 - 2.3.3 Les MPR pour la qualité de service
- 2.4 *Calcul de routes à qualité de service*

2 Etat de l'art

De manière générale, la notion de qualité de service (QoS) suppose à la fois :

- qu'il existe des niveaux de qualité dans le fonctionnement d'un service et que les contraintes à satisfaire pour atteindre chacun de ces niveaux soient bien définies ;
- que le prestataire connaisse ces contraintes, qu'il met en œuvre des mécanismes pour les satisfaire et est capable de constater le niveau de qualité effectivement délivré ;
- que le client ayant souscrit à un niveau de qualité pour le service puisse vérifier le niveau de qualité qui lui est effectivement fourni, et qu'il ait la possibilité de renoncer au service si ce niveau effectif est trop inférieur au niveau souscrit.

Les deux premières remarques correspondent à la définition de la qualité de service telle que retenue par l'IETF. En effet, le RFC 2386 [39] définit la qualité de service comme étant « l'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 en un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables... ». La dernière remarque, concernant plutôt les utilisateurs, correspond à la recommandation E.800 de l'UIT-T⁹ qui propose la définition suivante pour la qualité de service: « Effet global des performances du service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur de service. ». Les références UIT-T 97, 98 et ISO 97b, 98 constituent le cadre standard pour définir les concepts de qualité de service et pour donner un traitement de gestion de la qualité de service et des mécanismes qui y sont associés. Le recueil [40] propose une synthèse intéressante sur tous les aspects liés à la qualité de service dans l'ingénierie des protocoles en général. Un des concepts clés pour la qualité de service est celui de la métrique.

2.1 Les métriques dans les MANET

La plupart des applications informatiques requièrent généralement une configuration matérielle minimale pour bien fonctionner. Les applications déployées dans un réseau spécifient en plus les contraintes que le réseau doit satisfaire pour que leur exécution corresponde à un niveau de qualité bien défini. Du point de vue du réseau, ces critères se traduisent en général en termes de capacité, de disponibilité, de latence et de fiabilité. Selon le

⁹ Union Internationale des Télécommunications-Standardisation des Télécommunications

type de réseau, ces concepts abstraits sont traduits en grandeurs mesurables identifiées sous le terme général de métrique.

Le tableau 2.1 suivant donne un aperçu des différentes métriques utilisées pour définir des contraintes de qualité de service liées aux applications courantes [41].

Tableau 2.1 Quelques applications multimédias et leurs contraintes de QoS¹⁰

| Type d'application | Détails | Qualité de service requise |
|---|---|---|
| Diffusion vidéo (télévision Internet, vidéo à la demande) | MPEG2, MPEG4 | Débit : 64 kbit/s à 2 Mbit/s Délai, gigue : compensables par la mémoire tampon |
| Diffusion audio (radio Internet) | MP3, AAC, OggVorbis | Débit : de 32 kbit/s à 256 kbit/s Délai, gigue : compensables par la mémoire tampon |
| Téléphonie (VoIP) | PCM-MIC, G.711 | Débit : 6,4 kbit/s à 64 kbit/s Latence : 150 ms à 300 ms Gigue : 0 à 50 ms Pertes : < 0,1 % |
| Vidéoconférence | Architecture H.323 Résolution vidéo (H.263) : de SUB-QCIF (128 × 96) à 16CIF (1 408 × 1 152) | Débit : 64 kbit/s à 1 920 kbit/s Délai : de l'ordre de 150 ms à 300 ms Gigue : 0 ms à 50 ms Pertes : < 0,1 % |
| Session interactive | SSH, telnet, VNC, T120 | Débits variables Délai de l'ordre de 600 ms Pertes nulles |

Les stations d'un réseau mobile ad hoc concentrent toutes les fonctionnalités liées au routage. De ce fait, toutes les métriques généralement prises en compte par les routeurs pour assurer le routage doivent pouvoir être prises en compte par toute station dans un MANET. Aux métriques qui caractérisent les liaisons sans-fil en général, peuvent s'ajouter des métriques liées à la spécificité des réseaux mobiles ad hoc. En effet, les stations d'un MANET sont en général caractérisées par des ressources limitées. L'état interne de la station, notamment son autonomie énergétique peut influencer directement sur son aptitude à participer au routage. La mobilité des nœuds induit également la nécessité de considérer des métriques telles que la stabilité d'une liaison ou sa durée de vie. Les lecteurs qui souhaitent des informations plus détaillées sur les métriques utilisées dans les réseaux mobiles ad hoc peuvent consulter l'état

¹⁰ Source : Chaudet C. (2005) [36]

de l'art proposé par Hanzo et Tafazolli [7]. Seules les métriques considérées dans les mécanismes de routage au niveau de la couche réseau du modèle OSI seront mentionnées dans ce mémoire.

2.1.1 Les métriques caractérisant les stations

Certaines métriques sont utilisées soit pour décrire l'état interne d'une station, soit pour caractériser cette dernière vis-à-vis de ses voisins ou de l'ensemble du réseau :

- **La charge résiduelle de sa batterie ou l'autonomie énergétique** d'une station peut être associée à une métrique permettant de l'évaluer par rapport aux autres stations. Dans le cadre du protocole OLSR par exemple, une caractéristique liée aux stations et identifiée sous le terme de WILLINGNESS [4] traduit l'aptitude d'une station à retransmettre du trafic en provenance d'autres stations. Dans [4] il est proposé de corréler le Willingness avec la charge de la batterie. Ainsi, dans un MANET où les stations utilisent OLSR comme protocole de routage, les stations disposant d'une autonomie énergétique plus importante seront plus souvent choisies pour retransmettre les messages diffusés dans le réseau. Le niveau d'énergie des stations est un facteur tellement important dans les MANET que plusieurs travaux y sont consacré [42][43][44][45][46]. En effet, l'épuisement de la batterie d'une station entraîne sa déconnexion du réseau, ce qui peut engendrer la disparition de plusieurs liaisons. Les conséquences peuvent aller jusqu'à la déconnexion d'une partie du réseau si la station concernée était le seul pont qui la reliait au reste du MANET. La **durée de vie** d'une station est également une métrique parfois associée à l'autonomie énergétique de cette station.
- **La capacité disponible du buffer de transmission d'une station** [47] est une métrique liée au trafic généré ou retransmis par une station. Elle permet par exemple de déterminer les stations les moins chargées pour la retransmission des paquets.
- **La mobilité ou la stabilité d'une station par rapport à son voisinage** [48] a également inspiré des métriques permettant de caractériser les stations d'un MANET.
- **La capacité d'adaptation d'une station face à la mobilité ou à la densité dans son voisinage** peut également être associée à des métriques susceptibles de jouer un rôle dans le choix des nœuds retransmetteurs de paquets [49].

2.1.2 Les métriques caractérisant les liaisons

La grande majorité des métriques étudiées dans les MANET caractérisent plutôt les liaisons entre les stations :

- **Le débit minimum disponible** sur une liaison ou sur une route est l'une des métriques ayant fait l'objet d'un très grand nombre d'études [36][37][50][51]. Il correspond à la capacité d'une route entre une station source et une station destination. Bien que la règle permettant de calculer cette capacité sur une route constituée de plusieurs liaisons soit assez claire, la valeur obtenue dépend des valeurs des capacités de chaque liaison. Le problème est que cette valeur dépend de tellement de facteurs dans les réseaux sans fil en général, et dans les MANET en particulier, qu'aucune des méthodes d'estimation proposées jusqu'à présent ne fait l'unanimité.
- **Le délai de bout-en-bout** est le temps qui s'écoule entre le moment où un paquet est enregistré pour un envoi par la source et le moment où il est intégralement reçu par la destination. Cette métrique est également l'une des plus étudiées et elle est utilisée notamment dans [52].
- **La gigue** est la variation entre la valeur maximale observée sur le délai de bout-en-bout et le délai de transmission minimum observé [53][54][55].
- **La robustesse d'une liaison** qui est généralement associée à la valeur estimée ou effectivement mesurée **du taux de perte** de paquets sur une liaison [56][57].
- **La stabilité d'une liaison** ou d'une route est également une métrique intéressante. On peut aussi bien la corrélérer à la stabilité des stations impliquées qu'à leur durée de vie. Rubin et Liu [58] proposent un modèle pour la qualité de service dans les MANET qui utilise la durée de vie des liaisons comme métrique.

La plupart des métriques associées aux liaisons ci-dessus sont susceptibles de faire l'objet d'une exigence particulière en termes de qualité de service de la part de certaines applications. Celles qui ne sont pas directement concernées pourraient également être prises en compte dans le cadre d'un travail sur la qualité de service. Cela ajouterait une particularité à la proposition ainsi faite. Cette dernière serait alors difficile à comparer de façon objective aux solutions pour la qualité de service portant sur des métriques identiques à cause de la prise en compte d'une métrique annexe. Le nombre de métriques présentées dans cette section met en évidence le fait que cette situation peut se produire dans un nombre relativement élevé de cas.

Les approches de conception des mécanismes de la QoS citées en référence lors de la présentation de chacune des métriques proposent pour la plupart des mécanismes spécifiques à la métrique considérée. Lorsque des métriques annexes sont prises en compte, il n'est pas toujours mentionné comment elles sont traitées dans le cadre des mécanismes proposés.

Nous pensons qu'il serait intéressant que :

- les mécanismes ainsi que les algorithmes soient formulés de telle sorte qu'ils puissent être utilisés pour n'importe quelle métrique de qualité de service ;
- les métriques considérées pour des raisons autres que la qualité de service ainsi que la manière dont elles sont prises en compte dans les différents mécanismes proposés soient mentionnées de façon explicite.

Un moyen pour y parvenir consiste à adopter une représentation des MANET qui intègre les métriques et qui repose sur une description formelle des hypothèses retenues pour certains constituants du MANET.

2.2 Modélisation et représentation des MANET

La représentation la plus utilisée dans les travaux sur la qualité de service est un graphe non orienté auquel on ajoute éventuellement les métriques de qualité de service comme des poids sur les nœuds ou sur les arcs [36][38]. En général, les hypothèses faites sur le MANET ne sont pas explicitement évoquées parce qu'elles sont supposées être associées à la modélisation considérée. Une étude détaillée des différentes modélisations proposées pour les MANET est présentée dans la thèse de Dmitri Lebedev [27].

2.2.1 Le modèle Unit Disk Graph (UDG)

Le modèle du disque unitaire ou Unit Disk Graph (UDG) [59] est l'un des premiers à avoir été proposés. Il considère qu'une liaison existe entre deux stations dès lors que la distance euclidienne séparant ces stations est inférieure à une valeur prédéfinie R . Cette dernière correspond à la portée de la technologie sans fil utilisée. La distance euclidienne est une donnée symétrique par rapport aux deux stations considérées. La représentation du réseau mobile ad hoc qui découle du modèle UDG est donc un graphe $G(V, E)$ non orienté [60], V

étant l'ensemble de sommets ou nœuds qui représentent les stations, et E celui des arcs qui représentent les liaisons. Deux principaux reproches sont faits à ce modèle :

- le premier est qu'il ne prend pas en compte les interférences causées par le trafic échangé entre les nœuds voisins de ceux impliqués dans la liaison considérée.
- le second, qu'il ne capture pas les atténuations qui peuvent être causées par la distance entre les nœuds, les obstacles qui les entourent ou leur mobilité.

Malgré ces inconvénients, le modèle UDG reste l'un des plus utilisés même dans les solutions pour la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc. Pour résoudre le premier problème, une solution consiste à utiliser un modèle de transmission plus réaliste qui prend en compte les perturbations dues au trafic environnant. Le Signal-to-Interference Ratio (SIR) ou le Signal-to-Noise Ratio (SNR) sont autant d'approches proposées pour évaluer plus précisément la disponibilité et la qualité d'une liaison en présence d'interférences [27].

2.2.2 Les modèles non géométriques aléatoires

Un des constats à l'origine de ce type de modèle est que dans un environnement restreint, par exemple un étage complet de bureaux, les obstacles divers faussent les hypothèses de connectivité des modèles géométriques. Des graphes aléatoires tels que celui dit d'Erdős-Rényi [61] sont basés sur l'hypothèse qu'on peut générer une topologie où l'existence d'un arc entre deux nœuds i et j a une probabilité équivalente à une valeur p . La représentation qui en résulte est donc un graphe non orienté $Gp(V, E)$ où V et E sont les ensembles respectivement des nœuds et des arcs, et p la valeur de la probabilité considérée. A ce modèle aléatoire, on peut associer un modèle de transmission qui prend en compte les interférences tel que cela a été mentionné dans la section précédente. Même si le recours à un modèle purement aléatoire soulève inévitablement la question de sa validité, plusieurs résultats intéressants ont été obtenus sur des propriétés des réseaux sans fil grâce à ce type de modèle.

2.2.3 Le modèle LogNormal Shadowing (LNS)

Stojmenovic et al [62] recourent au modèle LogNormal Shadowing (LNS) pour proposer une représentation des transmissions dans les réseaux sans fil. Le modèle résultant est un modèle géométrique comme le modèle UDG. L'existence d'une liaison n'est pas purement aléatoire, mais elle reste bien associée à la distance entre les nœuds impliqués. Cependant, la robustesse de la liaison, estimée par la probabilité que les transmissions se déroulent correctement, est

une fonction de la distance. Dans les études sur l'atténuation du signal, ce modèle est associé aux perturbations macroscopiques latentes tels que la présence de bâtiments, une mobilité constante et à faible vitesse. L'étude présentée dans [62] recommande que les valeurs de la probabilité sur les liaisons ainsi obtenues soient systématiquement prises en compte dans la modélisation du réseau lors de la conception des protocoles pour les réseaux sans fil en lieu et place du modèle UDG. Ingelrest et Simplot-Ryl [63] ont appliqué ces recommandations aux réseaux ad hoc. Il est envisageable de recourir au modèle LNS et au SIR pour prendre en compte l'influence macroscopique de l'environnement et l'impact du trafic au travers des interférences.

A l'issue de cette présentation, nous faisons remarquer que toutes les modélisations proposées, géométriques ou non, aboutissent à une représentation du MANET sous la forme d'un graphe non orienté. Le modèle LNS a le mérite d'intégrer en natif une propriété qui permet de corréler la qualité d'une liaison avec la distance qui sépare les nœuds considérés au travers de la mesure de la probabilité de réception correcte des paquets transmis sur cette liaison. Cette mesure peut être associée à une métrique souvent utilisée pour la qualité de service, à savoir le taux de perte. Cependant, pas plus que les autres modèles, LNS ne permet pas de prendre en compte l'asymétrie des liaisons par rapport aux métriques de qualité de service.

Des graphes générés suivant les hypothèses proposées par ces différents modèles peuvent servir à l'évaluation des solutions pour la qualité de service dans les MANET. Néanmoins, une représentation prenant en compte les métriques et traduisant au mieux les propriétés d'un MANET dans un contexte de mise en œuvre de la qualité de service reste une nécessité.

2.3 Structuration du MANET avec les relais multipoint (MPR)

Toutes les fonctions assurées par l'infrastructure dans un réseau classique sont réalisées de façon distribuée par les stations d'un MANET. Cette particularité associée à la mobilité et aux ressources limitées des nœuds rendent inefficace et inadapté le recours à des algorithmes centralisés pour le contrôle de la topologie ou le routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Guo et Yang [64] en font état dans leurs travaux sur l'économie d'énergie dans les MANET.

Dans OLSR, chaque station choisit un sous-ensemble de ses voisins à un saut qui lui permet d'atteindre tous ses voisins à deux sauts [4]. Les éléments de ce sous-ensemble particulier sont appelés les Relais Multipoint ou MPR [30]. L'usage de cette technique permet de réduire considérablement l'impact de la diffusion des messages de contrôle et contribue à la performance globale du protocole. L'optimisation de la diffusion ainsi obtenue grâce aux MPR est d'autant plus importante que le nombre de MPR sélectionnés par chaque station est très proche du minimum.

D'autres études, notamment dans [65] poursuivent des objectifs similaires. Plusieurs approches exploitant des idées différentes ont été proposées pour tenter d'optimiser la diffusion dans OLSR, notamment en recourant aux Connected Dominating Sets [66][67][68]. Dans [64], les auteurs soulignent la forte dépendance qui existe entre les protocoles OLSR et MPR. Ils établissent par la même occasion que les tentatives de remplacer les MPR dans OLSR par une autre méthode conduisent à des résultats moins performants.

Nous pensons donc que les efforts pour optimiser au maximum la diffusion dans OLSR doivent se concentrer sur la recherche d'algorithmes rapides, résistant au passage à l'échelle et garantissant un nombre de MPR très proche du minimum, si possible avec un écart borné.

De plus, dans OLSR les MPR sont les seuls nœuds du MANET autorisés à générer et à retransmettre les messages de contrôle de la topologie dits TC messages. Dans ces messages, chaque MPR annonce à l'ensemble du réseau la qualité des liaisons qui le rattachent aux nœuds l'ayant sélectionné en tant que MPR : les MPR selectors [4]. Ces informations servent à chaque nœud du réseau pour construire sa vue locale de la topologie du réseau et calculer sa table de routage. On comprend dès lors l'importance que jouent les MPR dans la mise en œuvre de la qualité de service dans OLSR. Il faut en effet que chaque nœud sélectionne ses MPR en fonction de la qualité des routes, au sens des métriques de qualité de service, que ces MPR lui permettent d'établir avec ses voisins à deux sauts. Sachant que ce sont ces liaisons avec ses MPR qui seront annoncées à l'ensemble du réseau et qui serviront pour le calcul de routes permettant aux autres nœuds de l'atteindre, le nœud a ainsi une raison supplémentaire de sélectionner ses MPR en prenant en compte les valeurs des métriques de qualité de service. Plusieurs algorithmes pour la sélection des MPR ont été proposés dans la littérature aussi bien dans le but d'optimiser la diffusion, que dans celui de permettre la mise en œuvre de la qualité de service. Nous reprenons ici les principales propositions, en particulier celles qui ont été appliquées au protocole OLSR.

2.3.1 Notations

Afin de faciliter la présentation des heuristiques proposées pour la sélection des MPR, nous adoptons la représentation d'un MANET sous la forme d'un graphe $G(V, E)$. Chaque station constituant de manière tout à fait autonome son ensemble de relais multipoints, nous nous plaçons au cœur d'une station particulière notée i et nous observons son voisinage à un saut $N^1(i) = \{j \in V : (i, j) \in E\}$ et celui à deux sauts $N^2(i) = \bigcup_{j \in N^1(i)} N^1(j) - N^1(i) - \{i\}$.

Nous notons par $d(i) = |\{x \in N^1(i) : (i, x) \in E\}|$ le degré du sommet i . C'est le nombre d'arcs qui ont la station i pour origine ou pour destination. Pour un sommet x dans $N^1(i)$, on note par $d^+(x)$ le nombre de successeurs de x dans $N^2(i)$. Inversement, pour un sommet y dans $N^2(i)$, on note par $d^-(y)$ le nombre de prédécesseurs de y dans $N^1(i)$.

Nous notons enfin par MPR_i , l'ensemble de MPR sélectionnés par le nœud i .

2.3.2 Les MPR pour optimiser la diffusion

Certains des algorithmes proposés ne visent que l'optimisation de la diffusion en réduisant le nombre de MPR [30][70]. D'autres cherchent en même temps à renforcer la stabilité du réseau en favorisant les nœuds ayant un *Willingness* plus élevé [4] ou la robustesse en maximisant la probabilité de transmission correcte des paquets [63]. Nous proposons une présentation succincte de chacune de ces heuristiques.

Le simple greedy (SG)

Les auteurs de la technique des multipoints relais proposent une heuristique dénommée *simple greedy (SG)* [30]. C'est une adaptation aux réseaux mobiles ad hoc de l'heuristique de type glouton proposée par Chvátal [71] pour résoudre le Minimum Set Covering Problem (MSCP). L'idée consiste pour un nœud i à sélectionner à chaque étape le nœud de $N^1(i)$ adjacent au plus grand nombre de nœuds non couverts dans $N^2(i)$.

Cette heuristique est rapide, même sur des instances de grande taille, et elle fournit de bons résultats concernant le nombre de MPR sélectionnés. Notons par $\underline{N}^2(i)$ l'ensemble des nœuds de $N^2(i)$ qui ne sont pas couverts.

Algorithme 1 : SG

```

Entrées :  $N^1(i), N^2(i)$ 
1   début
2    $MPR_i = \emptyset$ 
3   Étape 1 :  $\underline{N}^2(i) = N^2(i)$ 
4        $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : \exists k \in \underline{N}^2(i), (j, k) \in E \text{ ET } |\{(q, k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\}| = 1\}$ 
5        $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$ 
6   Étape 2 : TANT QUE  $\underline{N}^2(i) \neq \emptyset$  FAIRE
7        $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : |\{(j, k) \in E : k \in \underline{N}^2(i)\}| = \text{MAX}\{|\{(o, p) \in E : p \in \underline{N}^2(i)\}|, \forall o \in (N^1(i) \setminus MPR_i)\}\}$ 
8        $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus N^1(j)$ 
9   FIN TANT QUE

```

Les auteurs [30] démontrent que cette heuristique obtient un nombre de MPR au plus un facteur $\log m$ plus grand que l'optimum, m étant le degré maximum d'un nœud du réseau. Adjih et al. [66] mentionnent que sa complexité est un $O(m^2)$ en temps. Malgré ces deux qualités, le *simple greedy* ne permet pas de garantir la robustesse et la stabilité de la structure créée dans le réseau en sélectionnant les MPR uniquement sur la base des degrés des nœuds. En effet, dans leurs travaux Mans et Shrestha [70] proposent plusieurs variantes du *simple greedy* pour la sélection des MPR, notamment en introduisant des poids. Ils réalisent une évaluation des performances qui confirment que le *simple greedy* initialement utilisé dans OLSR obtient le plus petit nombre de MPR globalement et qu'il réalise le plus faible taux de retransmissions de paquets. Mais leurs résultats confirment également qu'en recourant au *simple greedy*, on obtient un taux plus élevé de paquets non reçus par les destinataires. Une des raisons est la collision à l'interface du récepteur des copies d'un même paquet retransmises par deux MPR différents. Ils proposent une heuristique sélectionnant les MPR de manière à éviter cette redondance. Ces conclusions justifient et confortent les choix faits dans d'autres travaux d'introduire des poids qui permettent d'évaluer la qualité des liaisons obtenues lors de la sélection des MPR. Néanmoins, les avis divergent en ce qui concerne le recours ou non à la redondance. Outre les variantes proposées dans [70], il y a de nombreux travaux allant dans ce sens, mais nous nous intéressons particulièrement à deux d'entre eux.

L'heuristique du RFC 3626

Dans le RFC spécifiant OLSR [4], les auteurs proposent une heuristique qui est une variante du *simple greedy*. La particularité de cette heuristique que nous noterons 3626 est qu'elle introduit un poids appelé Willingness sur les nœuds. Le Willingness traduit l'aptitude d'un nœud à relayer du trafic dans le MANET. Notons $W(x)$ la valeur du Willingness d'un nœud x . L'heuristique 3626 modifie le *simple greedy* comme suit :

Algorithme 2 : 3626

```

Entrées :  $N^1(i), N^2(i)$ 
1   début
2    $MPR_i = \emptyset$ 
3   Etape 1 :  $\underline{N}^2(i) = N^2(i)$ 
4        $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : W(j) = 7\}$ 
5        $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$ 
6   Etape 2 :  $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : \exists k \in \underline{N}^2(i), (j,k) \in E \text{ ET } \forall \{(q,k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\} | = 1\}$ 
7        $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$ 
8   Etape 3 : TANT QUE  $\underline{N}^2(i) \neq \emptyset$  FAIRE
9        $A = \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : W(j) = \text{MAX}\{W(x), x \in N^1(i) \setminus MPR_i\}\}$ 
10      SI  $|A| > 1$  ALORS
11           $B = \{j \in A : |\{(j,k) \in E : k \in \underline{N}^2(i)\}| = \text{MAX}\{|\{(o,p) \in E : p \in \underline{N}^2(i)\}|, \forall o \in A\}\}$ 
12          FIN SI
13           $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in B : d^+(j) = \text{MAX}\{d^+(x), x \in B\}\}$ 
14           $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus N^1(j)$ 
15      FIN TANT QUE

```

La spécification [4] reste volontairement ouverte sur le rôle qu'on peut conférer au Willingness. Un exemple fourni est qu'il peut représenter la capacité résiduelle de la batterie du nœud sur une échelle de 0 à 7, 0 étant la plus faible valeur et 7 la plus forte. Ainsi, choisir en tant que MPR des nœuds ayant potentiellement une autonomie énergétique plus longue se présente comme une garantie de stabilité à long terme de la structure construite dans le MANET sur la base de ces MPR.

L'heuristique 3626 perd une des qualités essentielles des heuristiques inspirée du *simple greedy*, elle ne peut pas garantir un écart borné par rapport au nombre *minimum* de MPR. En effet, le critère principal pour choisir les MPR n'est plus le degré relatif du nœud, mais bien son *Willingness*. Deux situations au moins méritent un éclaircissement dans cet algorithme :

- La sélection systématique des nœuds ayant un *Willingness* égal à 7 peut entraîner un accroissement prohibitif du nombre de MPR. Néanmoins, il semble que dans la pratique cette option ne soit utilisée que pour des nœuds spécifiques placés par des opérateurs contrôlant le réseau dans le but de pallier les défauts de connectivité.
- Les nœuds dont le *Willingness* vaut 0 ne peuvent pas être sélectionnés comme MPR. Nous pensons qu'ils devraient être écartés du réseau. De tels nœuds sont en fin d'autonomie et il vaut mieux ne pas considérer les liaisons s'y rapportant lors de la construction du voisinage. Ce cas met en évidence une des faiblesses du *simple greedy*. En effet, dans l'approche utilisant le *simple greedy*, non seulement de tels nœuds servent à construire le voisinage, mais aussi ils sont susceptibles d'être choisis comme MPR. Un choix au niveau de la spécification d'OLSR consistant à exclure ces

nœuds dès l'étape de la découverte du voisinage permettrait d'éviter le problème, même pour l'approche recourant au *simple greedy*. Néanmoins, le fait que cette dernière heuristique ne prenne pas en compte le *Willingness* conservera à cette approche l'inconvénient de construire une structure qui persistera moins longtemps comparée à une approche utilisant le 3626.

Nous faisons néanmoins remarquer qu'il existe des variantes du *simple greedy* et du 3626 citées notamment dans [70]. Ces variantes ajoutent une étape permettant de supprimer de l'ensemble des MPR des nœuds superflus qui auraient été choisis essentiellement à cause de l'ordre arbitraire dans lequel se fait l'exploration.

Maximiser la probabilité de transmission correcte avec MAXP

L'approche utilisant 3626 introduit une certaine stabilité en utilisant une caractéristique associée aux nœuds, à savoir le *Willingness*. En favorisant des nœuds ayant une autonomie énergétique plus importante, cette approche devrait permettre d'obtenir une stabilité plus longue de la structure émergeant du choix des MPR. Dans leurs travaux, Ingelrest et Simplot-Ryl [63] relèvent une observation intéressante : avec les heuristiques basées sur le *simple greedy*, les MPR choisis par un nœud i sont pour la plupart choisis à la frontière de sa portée. Intuitivement, la position occupée par ces derniers leur permet d'avoir une portée plus étendue sur le second voisinage de i . Ils sont donc plus susceptibles de couvrir un plus grand nombre de nœuds du second voisinage de i .

Comme relevé au chapitre précédent, le modèle de transmissions Unit Disk Graph (UDG) [59] sur lequel se basent la plupart des travaux suppose que les transmissions se font correctement si les nœuds impliqués sont dans le champ de portée l'un de l'autre. Stojmenovic et al. [62] suggèrent que le modèle LogNormal Shadowing (LNS) soit pris en compte pour modéliser les transmissions lors de la conception des protocoles pour les réseaux sans fil. Ce modèle prend en compte l'atténuation du signal due à la distance et aux obstacles éventuels entre les deux nœuds impliqués. Ainsi, à conditions environnementales égales, la probabilité qu'une transmission se passe correctement n'est pas la même entre deux nœuds à mi-distance de leur portée par rapport à celle des nœuds situés à la limite de la portée l'un et l'autre. S'appuyant sur ces résultats, Ingelrest et Simplot-Ryl [63] préconisent que le déficit, mis en évidence notamment dans [70], au sujet du taux de messages correctement transmis en recourant au *simple greedy* provient du fait que les MPR sont choisis en majorité à la frontière de la portée. Ils suggèrent donc de recourir au modèle LNS pour associer une probabilité de

réussite de transmission aux différentes liaisons, et de prendre en compte ces valeurs lors de la sélection des MPR.

Ils proposent une série de trois algorithmes dont les deux premières sont des variantes assez triviales du *simple greedy*. Nous ne présenterons que le troisième algorithme qui introduit une idée assez originale, le recours à la redondance des MPR couvrant chaque nœud du second voisinage pour augmenter la probabilité qu'il reçoive les messages qui lui sont retransmis.

Le nœud qui procède à la sélection des MPR est noté i . Conformément aux définitions proposées dans [63], notons par :

- $P(x, y)$: la probabilité de transmission correcte sur l'arc reliant x à y ;
- $S(x_i) = P(i, x_i) * \sum_{j \in (N^1(x_i) \cap N^2(i) - N^1(MPR_i))} P(x_i, j)$: une fonction de score qui permet d'évaluer les candidats MPR en fonction de la probabilité avec laquelle ils couvrent le second voisinage de i .
- P_{min} : une valeur seuil sur la probabilité considérée comme le minimum satisfaisant.

Algorithme 3 : MAXP

```

Entrées :  $N^1(i), N^2(i), P_{min}$ 
1   début
2    $MPR_i = \emptyset$ 
3   Etape 1 :  $\underline{N}^2(i) = N^2(i)$ 
4        $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i; \exists k \in \underline{N}^2(i), (j, k) \in E \text{ ET } \forall \{(q, k) \in E: q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\} | = 1\}$ 
5        $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$ 
6   Etape 2 : TANT QUE  $\underline{N}^2(i) \neq \emptyset$  ET  $MPR_i \neq N^1(i)$  FAIRE
7        $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i; S(j) = \text{MAX}\{S(x), x \in N^1(i) \setminus MPR_i\}\}$ 
8       POUR  $q \in (N^1(j) \cap \underline{N}^2(i))$  FAIRE
9           SI  $(1 - \prod_{t \in N^1(q) \cap MPR_i} (1 - P(t, q))) \geq P_{min}$  ALORS
10           $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus \{q\}$ 
11          FIN SI
12      FIN POUR
13  FIN TANT QUE

```

MAXP peut facilement être intégré dans OLSR. En effet, le RFC [4] définit le concept de *coverage* qui consiste à assurer que chaque nœud soit couvert, dans la mesure du possible, par au moins un certain nombre de MPR. Néanmoins, comme pour 3626, *MAXP* ne peut pas garantir un écart borné par rapport au nombre minimum de MPR. L'ajout systématique de nœuds dans l'ensemble de MPR pour faire passer tous les nœuds déjà couverts au dessus du seuil P_{min} peut accroître fortement le nombre de MPR. De plus, comme le font remarquer Mans et Shrestha [70], le recours à la redondance risque d'augmenter les risques de collisions au niveau de l'interface du destinataire. Il faudrait donc introduire un mécanisme supplémentaire qui puisse permettre de réduire ce risque.

2.3.3 Les MPR pour la qualité de service

Des algorithmes pour la sélection des MPR ont été proposés dans la plupart des travaux pour la qualité de service dans les MANET utilisant OLSR comme protocole de routage. Nous ne présentons que les algorithmes les plus représentatifs de différentes approches.

Approches basées sur une seule métrique

Bien qu'il fût à l'origine proposé pour améliorer la robustesse de la structure créée dans un MANET par le choix des MPR, *MAXP* [63] peut être considéré comme un algorithme pour la qualité de service basée sur une métrique liée taux de perte. L'idée d'exploiter la redondance en fait une approche originale. Une autre approche est proposée dans [31] par Ge et al. Les auteurs proposent une série de trois algorithmes pour mettre en œuvre la garantie de la qualité de service en fonction du débit des liaisons. Les deux premiers algorithmes proposés sont des variantes assez triviales du *simple greedy*. Nous ne présentons donc que la troisième heuristique, notée *GE3*.

L'idée de cette heuristique est assez simple : choisir les MPR de manière à atteindre tout voisin à deux sauts par la route de débit maximal. Notons par $B(x, y)$ le débit sur l'arc (x, y) .

Algorithme 4 : GE3

Entrées : $N^1(i)$, $N^2(i)$

1 début

2 $MPR_i = \emptyset$

3 POUR $q \in N^2(i)$ FAIRE

4 $MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : \min\{B(i, j), B(j, q)\} = \max\{\min\{B(i, x), B(x, q)\}, x \in N^1(i)\}\}$

5 $N^2(i) = N^2(i) \setminus \{q\}$

6 FIN POUR

GE3 garantit à chaque nœud du second voisinage d'être atteint avec le débit maximal possible au vu de la configuration du MANET. Lorsque *GE3* est utilisé comme heuristique pour la sélection des MPR, tous les nœuds du réseau peuvent construire des routes optimales en termes de débit vers toutes les destinations connues. Les auteurs soutiennent que *GE3* peut être appliquée à n'importe quel type de métrique. Néanmoins, le nombre de MPR sélectionnés par *GE3* est complètement imprévisible et peut croître fortement, avec des conséquences qui pourraient devenir prohibitives. Des évaluations qu'ils ont menées, les auteurs concluent que

GE3 améliore effectivement le débit disponible pour les stations utilisant OLSR, mais que les délais observés sont alors plus élevés que dans le mode best-effort.

Approches multi-métriques

Il est assez surprenant de constater que dans les nombreux travaux consacrés au routage avec qualité de service dans OLSR sur la base de plusieurs métriques à la fois, très peu d'algorithmes prennent en compte les métriques de qualité de service lors de la sélection des MPR. Dans quasiment tous les travaux, les auteurs proposent plutôt des algorithmes destinés au calcul des routes [72][73]. Mais, comme nous l'avons fait remarquer au début de la section 2.3, la sélection des MPR sur base des mêmes métriques de qualité de service considérées est essentielle. En effet, les liaisons annoncées à l'ensemble du réseau dans les messages TC sont précisément les liaisons qui rattachent les nœuds à leurs MPR selectors. Ce sont ces liaisons qui seront reprises dans la topologie locale construite par chaque nœud, et sur base de laquelle seront calculées les routes à QoS. Par conséquent, à l'exception des nœuds se trouvant jusqu'à deux sauts du nœud i vers lesquels les liaisons sont connues de manière quasi exhaustive, la qualité des routes vers toutes les autres destinations dépend des informations reçues via les messages TC. Dans leurs plus récentes études sur le sujet, les auteurs des principaux travaux pour la QoS dans les MANET avec OLSR [37]¹¹ [38] concordent vers une même démarche qui consiste à recourir à deux ensembles différents de MPR:

- Le premier ensemble noté $FMPR_i$ a pour but d'optimiser la diffusion. Ces nœuds sont les seuls autorisés à relayer le trafic de broadcast généré ou retransmis par le nœud i . L'heuristique utilisée pour sélectionner les $FMPR_i$ est le *simple greedy* (SG) ;
- Le second ensemble noté $QMPR_i$ vient pallier à l'insuffisance que nous avons relevée en début de cette section. Les $QMPR$ sont sélectionnés sur base des métriques de QoS pour permettre un calcul ultérieur de routes à QoS. Pour pouvoir prendre en compte le maximum de bonnes liaisons, aucune contrainte n'est prise en compte sur leur nombre. L'heuristique *GE3* ou ses variantes sont utilisées à cette fin [38].

Les auteurs ayant adopté cette démarche, notamment dans [38], affirment qu'ainsi on arrive à la fois à optimiser la diffusion et à permettre le calcul de routes à qualité de service. En réalité, l'impact négatif du recours à deux ensembles de MPR est beaucoup plus important qu'on pourrait le penser à première vue :

¹¹ Pour la référence [40], le draft est disponible à l'url: <http://tools.ietf.org/id/draft-badis-manet-qolsr-05.txt>

- La sélection de MPR pour optimiser la diffusion en soit est déjà consommatrice de ressources (énergie, puissance de calcul) du fait de sa fréquence. En effet, elle intervient au moins à chaque changement de topologie détectée à la réception de messages HELLO, c'est-à-dire à peu près toutes les deux secondes selon le RFC [4]. Cette consommation de ressources croît forcément avec la taille des voisinages à un et deux sauts, ainsi qu'avec les changements induits par la mobilité. Ajouter à cette tâche la sélection des *QMPR* ne contribue pas à optimiser l'utilisation des ressources.
- Les *QMPR* sélectionnés doivent à leur tour diffuser à travers le réseau, via les messages TC, les informations de QoS sur les liaisons les rattachant à leurs selectors. Si leur nombre n'est pas limité, il en va de même du trafic additionnel qui sera diffusé dans le réseau lors de l'émission des messages TC.

Ces deux observations, certes faites a priori, nous ont encouragés à proposer et à évaluer comparativement aux précédentes solutions une nouvelle heuristique pour la sélection de MPR que nous présentons au chapitre 3. Le triple objectif poursuivi est à la fois d'assurer l'optimisation de la diffusion et de permettre la mise en œuvre de la QoS, tout en évitant d'introduire un coût prohibitif pour les performances du protocole de routage.

2.4 Calcul de routes à qualité de service

Des algorithmes proposés dans la littérature pour le calcul de routes à qualité de service, ceux qui méritent une attention particulière sont ceux destinés au calcul de routes multicritères. Ce problème est abordé dans les réseaux en général notamment par Martins [74]. Pour permettre une adaptation aux contraintes des réseaux mobiles ad hoc, des algorithmes ont été proposés par Costa et al [72] ainsi que par Badis et Al Agha [73]. Les deux études proposent une série d'algorithmes basés sur des idées sensiblement proches. Le premier algorithme prend en compte une seule métrique de qualité de service. Le second algorithme mixe plusieurs métriques en une seule. A l'exception de la définition de la fonction qui réalise le mixage, cette solution est identique à la précédente. Enfin, le troisième algorithme associe deux métriques en tentant d'abord d'obtenir la meilleure valeur pour la première métrique, et en recourant à une technique similaire à la correction de marquages [74] pour améliorer la valeur de la seconde métrique. Les auteurs combinent ensuite ces méthodes pour proposer des

algorithmes prenant en compte trois métriques de qualité de service ou plus. Les algorithmes présentés adoptent ainsi pratiquement toutes les approches connues pour le calcul de routes multicritères en essayant de garder une faible complexité pour permettre leur application aux réseaux mobiles ad hoc.

Il convient de faire remarquer que lorsque les algorithmes proposés dans les travaux sont utilisés pour le calcul de routes dans un protocole proactif tel qu'OLSR, ils se basent sur le graphe représentant la vue locale de la topologie du réseau. Cette dernière est construite sur base de la connaissance :

- des voisinages à un saut et deux sauts, et
- des liaisons annoncées par des MPR qui n'ont pas été sélectionnés à la base en prenant en compte les métriques de qualité de service.

Les routes sont donc calculées sur un graphe dont on ne peut être certain qu'il contienne les meilleures liaisons pour les valeurs des métriques de qualité de service.

3

Représentation des MANET pour la qualité de service

- 3.1 *Représentation générique des MANET pour la QoS*
 - 3.1.1 Formalisation de la notion de métrique
 - 3.1.2 Représentation générique d'un MANET caractérisé par n métriques
 - 3.1.3 Concepts et opérations dans $G(V,E,M)$
- 3.2 *Formulations du problème de la sélection des MPR*
 - 3.2.1 Les MPR pour optimiser la diffusion
 - 3.2.2 Les MPR pour la qualité de service
- 3.3 *Conclusion*

3 Représentation des MANET pour la qualité de service

Ce chapitre présente l'aspect modélisation de nos contributions dans le cadre de cette thèse. La première partie est consacrée à la représentation que nous proposons pour les réseaux mobiles ad hoc. Nous visons les deux objectifs ci-après :

- formuler un ensemble de concepts applicables à tout type de métrique, permettant entre autres de la quantifier et de décrire les opérations qui s'y rapportent ;
- proposer un modèle de représentation générique pour les réseaux mobiles ad hoc qui intègre les métriques, y compris celles relatives à la qualité de service. Cette représentation nous permet d'énoncer des hypothèses ainsi que des propriétés des MANET. Nous l'utilisons également pour proposer une démarche de conception d'algorithmes pour la mise en œuvre de la qualité de service.

En seconde partie de ce chapitre, nous étudions d'abord les mécanismes qui sont mis en œuvre pour optimiser la diffusion dans un MANET, en particulier les relais multipoints (MPR). Nous proposons ensuite une formulation du problème sous-jacent sous forme de programme mathématique. Nous étendons enfin cette formulation au cas où la sélection des MPR se fait en fonction des valeurs des métriques de qualité de service.

3.1 Représentation générique des MANET pour la QoS

Les solutions proposées pour garantir la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc reprennent la représentation du MANET sous forme d'un graphe $G(V, E)$ non orienté. Elles ajoutent ensuite aux nœuds ou aux arcs des poids correspondant aux valeurs des métriques de qualité de service considérées. Les remarques exposées dans les sections 2.1 et 2.2 montrent respectivement que :

- le nombre de métriques pouvant être prises en compte peut être élevé ;
- le nombre d'interprétations différentes qui peuvent être faites des liaisons en fonction de la modélisation sous-jacente peut être important.

Suite à ces observations, et afin que toute proposition pour la QoS soit clairement comprise, il est nécessaire que :

- toutes les métriques prises en compte soient mentionnées explicitement ;
- le statut des liaisons, ou tout au moins la modélisation sous-jacente utilisée, soit clairement annoncée.

Une manière intéressante de promouvoir cette bonne pratique dans la mise en œuvre de toute solution pour la QoS consiste à proposer une représentation des MANET qui soit générique, dans la mesure où :

- elle doit pouvoir être utilisée pour représenter un MANET quel que soit l'ensemble de métriques qui y sont considérées ;
- les mécanismes mis en œuvre en recourant à cette représentation doivent être valables quelle que soit la modélisation des MANET sous-jacente.

La représentation proposée s'articule autour de trois briques principales :

- les métriques ;
- la représentation du MANET sous forme d'un graphe incluant les métriques ;
- les opérations relatives à tous les éléments du graphe ainsi défini.

3.1.1 Formalisation de la notion de métrique

Les travaux sur le routage à qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc datent d'il y a à peine une dizaine d'années. Pourtant le nombre de protocoles proposés pour la QoS dans les MANET qui se basent sur le débit et le délai dépasse de loin le nombre de travaux analogues dans les réseaux filaires. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette situation :

- Les liaisons sans fil sont sujettes à plus de perturbations que les liaisons filaires. Dans ces dernières, les valeurs des métriques de QoS sur un segment varient essentiellement en fonction du trafic. A contrario, une liaison sans fil peut connaître une atténuation due à l'environnement, à une baisse du niveau d'énergie sur les nœuds considérés ou aux interférences causées par les communications des nœuds voisins. Selon que tous ou seulement une partie de ces facteurs sont pris en compte dans les hypothèses préalable à une étude sur les MANET, les résultats obtenus ne permettront pas une comparaison objective des solutions proposées ;

- La plupart des propositions pour le routage à QoS sont présentées avec une mention spécifique des métriques considérées. La représentation du MANET ainsi que les mécanismes et algorithmes proposés sont alors taillés sur mesure par rapport à ces métriques. L'application de méthodes similaires à celles de ces propositions à d'autres métriques entraîne des aménagements dans les hypothèses et la représentation considérées pour le MANET. Il en résulte que les propositions ainsi obtenues paraissent très différentes de celles qui les ont inspirées ;
- Les propositions portant sur des métriques identiques diffèrent par les méthodes d'estimation des valeurs desdites métriques, par les mécanismes de dissémination de l'information de QoS ou par les algorithmes de calcul de routes. Dans tous ces travaux, les évaluations menées portent en général sur l'ensemble de chaque proposition. Il suffit donc que deux propositions diffèrent sur un de ces aspects pour qu'elles apparaissent comme étant différentes.

Il ressort de ces observations qu'il est nécessaire de formaliser la représentation des réseaux mobiles ad hoc dans le but :

- d'une part, d'unifier toutes les propositions pour la qualité de services dans les réseaux mobiles ad hoc autour d'une représentation commune. Cette représentation serait constituée de briques ; et pour chacune d'elles toute proposition pour la QoS dans les MANET devrait pouvoir spécifier les hypothèses, les données sur le réseau, les mécanismes, les algorithmes et autres concepts utilisés.
- d'autre part, de simplifier la comparaison de différentes solutions proposées, notamment en restreignant les comparaisons aux briques pour lesquelles les éléments mis en œuvre sont effectivement différents.

Il s'agit donc dans un premier temps de conceptualiser la notion de métrique et de définir ses caractéristiques minimales qui doivent être spécifiées explicitement dans toute étude.

Définition 1 La métrique

Nous définissons une ***métrique*** notée m comme une caractéristique qui peut être associée à une station ou une liaison dans le réseau mobile ad hoc. Nous notons par M l'ensemble fini de toutes les métriques considérées dans une représentation d'un MANET.

Toute métrique doit donc être définie de façon explicite, et l'ensemble de métriques prises en compte dans le cadre d'une solution doit être clairement spécifié.

Définition 2 *La valeur d'une métrique*

Nous définissons **la valeur** d'une métrique m quelconque de M comme une fonction réelle surjective notée **val** qui, à toute station ou toute liaison entre deux stations caractérisées par la métrique m , associe une valeur réelle :

$$\forall m, \exists val: M \rightarrow \mathbb{R}, m \rightarrow val(m) \quad (1)$$

Pour chaque métrique, Il faut donc fournir une méthode claire et reproductible qui puisse permette de calculer la valeur de cette métrique pour la station ou la liaison considérée. A conditions égales, cette méthode doit donc fournir une valeur identique.

Définition 3 *La signature d'une métrique*

Nous définissons la **signature** d'une métrique m notée δ_m comme suit :

- $\delta_m = 1$ si la métrique a une meilleure valeur dans l'ordre croissant de ses valeurs réelles. Le débit est une métrique qui a une signature égale à 1.
- $\delta_m = -1$, si la métrique a une meilleure valeur dans l'ordre décroissant de ses valeurs réelles. Le délai est une métrique qui a une signature égale à -1.

Définition 4 *Intervalle de référence*

Soient a et b deux nombres réels tels que $a < b$.

Nous définissons par **intervalle de valeur de référence** I_R associé à un MANET un sous-ensemble de nombres réels compris entre a et b inclus tel que pour n'importe quelle métrique m on peut trouver une fonction croissante associant la **valeur** de m à un nombre réel dans I_R :

$$I_R = \{x, a \leq x \leq b, \forall m \in M, \exists f: \mathbb{R} \rightarrow [a, b], val(m) \rightarrow f(val(m))\} \quad (2)$$

Les valeurs naturelles de différentes métriques présentent parfois des écarts impressionnants. Il peut s'avérer utile de disposer de valeurs relatives sur un même intervalle pour toutes les métriques. L'intervalle de référence concrétise cette idée.

Définition 5 *Mise à l'échelle sur I_R à précision k*

Nous définissons par **mise à l'échelle de m sur I_R à précision k** , une fonction discontinue croissante notée $S(m, k)$ qui, pour toute métrique m , associe sa **valeur** à un nombre dans I_R réduit à une précision maximale de k décimales.

Proposition 1 La mise à l'échelle $S(m, k)$ peut être obtenue par la formule suivante :

$$\forall m \in M, \exists S(m, k): \mathbb{R} \rightarrow I_R, val(m) \rightarrow [b]_k = (c + d * 10^{-k}) \in I_R \quad (3)$$

Où $b \in I_R, c \in \mathbb{N}, d \in \mathbb{N}$ et $d \leq 10^k$. $[]_k$ arrondit la valeur pour la limiter à k décimales.

Proposition 2 Soient m_{min} et m_{max} respectivement les valeurs minimales et maximales que peut prendre une métrique m .

Soit $\Delta m > 0$ la variation maximale considérée comme négligeable entre deux valeurs de m .

La fonction $S(m, k)$ peut être totalement déterminée par :

$$S(m, k): \mathbb{R} \rightarrow I_R, val(m) \rightarrow \left[a + (val(m) - m_{min}) * \frac{b - a}{m_{max} - m_{min}} \right]_k \quad (4)$$

Où k est un entier naturel (arrondi à l'entier naturel supérieur $\lceil \cdot \rceil$) obtenu par :

$$k = \left\lceil \log_{10} \left(\frac{m_{max} - m_{min}}{\Delta m * (b - a)} \right) \right\rceil \quad (5)$$

En appliquant les propositions 1 et 2, les valeurs après mise à l'échelle sont obtenues par une simple interpolation linéaire. Il est bien entendu possible de définir une fonction de mise à l'échelle différente.

3.1.2 Représentation générique d'un MANET caractérisé par n métriques

Nous utilisons les concepts définis précédemment pour proposer une représentation des réseaux mobiles ad hoc. Notons par $M = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_p, m_{p+1}, m_{p+2}, \dots, m_{p+i}, \dots, m_{p+q}\}$ un ensemble de $n = p + q$ métriques, et dont le cardinal est $|M| = n$.

Définition 6 Vecteur noeud caractérisé par p métriques

Soit S une station d'un MANET dont les stations sont caractérisées par p métriques $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_p$.

Le vecteur noeud s associé à la station S est défini comme suit :

$$s = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_p), \quad (6)$$

$$\text{où } \forall j \in \{1, 2, \dots, p\}, s_j = val(m_j)$$

Définition 7 Forme réduite d'un vecteur noeud

Soit $s = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_p)$ un vecteur noeud. La forme réduite de s notée s^0 est définie par la donnée de ce vecteur noeud sans mention des valeurs associées aux métriques.

$$\forall s, s = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_p) \Rightarrow s^0 \quad (7)$$

Définition 8 Vecteur arc caractérisé par q métriques

Soient deux stations S et T faisant partie d'un MANET, auxquelles sont associées respectivement les vecteurs noeuds $s=(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_p)$ et $t=(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_p)$. Considérant que la liaison sans fil entre S et T est caractérisée par q métriques $m_{p+1}, m_{p+2}, \dots, m_{p+i}, \dots, m_{p+q}$, le vecteur arc $v=(s, t)$ est défini par :

$$v = (v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_{p+i}, \dots, v_{p+q}), \quad (8)$$

$$\text{où } \forall j \in \{p + 1, p + 2, \dots, p + q\}, v_j = val(m_j)$$

Définition 9 Forme étendue d'un vecteur arc

Soient deux vecteurs noeuds $s=(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_p)$ et $t=(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_p)$.

Soit $v=(v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_{p+i}, \dots, v_{p+q})$ le vecteur arc associé.

La forme étendue v^n du vecteur arc $v=(s, t)$ est obtenue en transférant les valeurs des métriques associées au vecteur noeud source s au vecteur arc initial v comme suit :

$$v^n = (v_1 = s_1, v_2 = s_2, \dots, v_i = s_i, \dots, v_p = s_p, v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_{p+i}, \dots, v_{p+q} = v_n) \quad (9)$$

Définition 10 Graphe représentant un MANET caractérisé par n métriques

Le graphe G représentant un MANET caractérisé par n métriques est obtenu en ajoutant à la représentation usuelle $G(V, E)$ l'ensemble M des métriques. Dans ce graphe noté $G(V, E, M)$:

V représente l'ensemble des vecteurs noeuds caractérisés par p métriques ;

E représente l'ensemble des vecteurs arcs caractérisés par q métriques ;

M représente l'ensemble des $n=p+q$ métriques caractérisant le MANET.

A ce stade, aucune hypothèse n'est faite sur l'interprétation des liaisons. Cette représentation peut s'appliquer à une étude analytique, indépendamment de la modélisation sous-jacente.

Définition 11 Forme équivalente de $G(V, E, M)$

Soit un graphe $G(V, E, M)$ représentant un MANET caractérisé par n métriques. Soit le graphe $G'(V', E', M)$ où V' et E' sont définis respectivement comme suit :

$$V' = \{s^0, \exists s \in V\} \text{ où } s^0 \text{ est la forme réduite de } s.$$

$$E' = \{v^n, \exists v \in E\} \text{ où } v^n \text{ est la forme étendue de } v.$$

$G'(V', E', M)$ est une forme équivalente de $G(V, E, M)$.

Le principal avantage de cette forme équivalente est que d'un point de vue opérationnel, elle permet de travailler sur un graphe qui ne comporte de poids que sur les arcs.

Proposition 3 $G'(V', E', M)$ est un graphe nécessairement orienté.

Preuve : Supposons que $G(V, E, M)$ est un graphe non orienté.

Les arcs (s, t) et (t, s) dans E sont alors identiques et correspondent au vecteur arc $v=(v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_{p+i}, \dots, v_{p+q})$.

Dans $G'(V', E', M)$, les arcs (s, t) et (t, s) de $G(V, E, M)$ sont respectivement associés à $(s^0, t^0) = (v_1 = s_1, v_2 = s_2, \dots, v_i = s_i, \dots, v_p = s_p, v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_{p+i}, \dots, v_{p+q} = v_n)$ et $(t^0, s^0) = (v_1 = t_1, v_2 = t_2, \dots, v_i = t_i, \dots, v_p = t_p, v_{p+1}, v_{p+2}, \dots, v_{p+i}, \dots, v_{p+q} = v_n)$

qui sont différents dès lors qu'au moins une des égalités $s_j = t_j$ ($j \in \{1, 2, \dots, p\}$) n'est pas vérifiée. En effet, dès lors que deux stations ont une valeur différente pour au moins l'une des métriques les caractérisant, les transmissions bidirectionnelles peuvent être affectées différemment.

Cette proposition 3 introduit l'hypothèse forte selon laquelle dans un MANET, les liaisons même symétriques au sens de la connectivité ne le sont pas forcément par rapport à la qualité qu'elles assurent aux transmissions bidirectionnelles. Cette idée est plus plausible qu'une symétrie parfaite.

3.1.3 Concepts et opérations dans $G(V, E, M)$

Dans la suite de cette thèse, le réseau mobile ad hoc sera désormais représenté par la forme équivalente de son graphe. Pour simplifier les notations, nous utiliserons la notation $G(V, E, M)$ pour désigner cette forme équivalente.

Définition 12 *Notion de route dans $G(V, E, M)$*

Soit un ensemble de noeuds $N=\{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_r\}$, avec $|N|=r$ et $r > 1$, vérifiant la propriété:

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, r - 1\}, \exists v = (s_j, s_{j+1}) \in E \quad (10)$$

On dit que la suite $(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_r)$ est une route de s_1 à s_r de longueur $r-1$ ou à $r-1$ sauts. Toute suite $(s_{j+1}, s_{j+2}, \dots, s_{j+h})$ d'un nombre h ($h>1$) de noeuds de N obtenue en prenant h noeuds successifs de la suite $(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_r)$ à partir de s_j ($1 \leq j \leq r-h$) est une route de longueur $h-1$ ou à $h-1$ sauts.

Proposition 4 *Tout vecteur arc de $G(V, E, M)$ est une route de longueur 1 ou à 1 saut.*

Définition 13 *Formes équivalentes d'une route dans $G(V, E, M)$*

Toute route $(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_r)$ dans $G(V, E, M)$ notée $s_1 \rightarrow s_r$ admet les formes équivalentes :

$s_I \rightarrow s_r = ((s_1, s_2), \dots, (s_i, s_{i+1}), \dots, (s_{r-1}, s_r))$ et

$s_I \rightarrow s_r = (v_1, \dots, v_i, \dots, v_{r-1})$ où $v_j = (s_j, s_{j+1})$

Une route $s_I \rightarrow s_r$ dans sa seconde forme équivalente $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_{r-1})$ est une suite de vecteurs arcs. Il est donc intéressant de pouvoir caractériser la route par rapport aux mêmes métriques utilisées pour caractériser les vecteurs arcs.

Définition 14 *Forme valuée d'une route dans $G(V, E, M)$*

Soit une route $s_I \rightarrow s_r$ dans $G(V, E, M)$.

On appelle *forme valuée* de $s_I \rightarrow s_r$ le vecteur $(e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n)$ où chaque e_j correspond à la valeur de la métrique m_j sur la route $s_I \rightarrow s_r$.

Définition 15 *Composition des valeurs des métriques dans $G(V, E, M)$*

Soit $s_I \rightarrow s_r = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_r)$ une route formée par une suite de vecteurs arcs $v_j = (v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jk}, \dots, v_{jn})$ où v_{jk} correspond à la valeur de la métrique m_k sur le vecteur arc v_j .

Soit $(e_1, e_2, \dots, e_k, \dots, e_n)$ la forme valuée de la route $s_I \rightarrow s_r$.

Nous définissons par *composition des valeurs de la métrique m_k* sur la route $s_I \rightarrow s_r$ la fonction C_k définie comme suit :

$$C_k: \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}, (v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{ik}, \dots, v_{rk}) \rightarrow C_k(v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{ik}, \dots, v_{rk}) = e_k = \text{val}(m_k) \quad (11)$$

Quelques exemples de règles de composition de métriques sont proposés dans [35]. Selon sa règle de C_k composition, une métrique est dite :

- **concave** si

$$C_k(v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{ik}, \dots, v_{rk}) = \text{Min}\{v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{ik}, \dots, v_{rk}\} \quad (12)$$

Le débit est une métrique concave.

- **additive** si

$$C_k(v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{ik}, \dots, v_{rk}) = \sum_{j=1}^{j=r} v_{jk} \quad (13)$$

Le délai est une métrique additive.

- **multiplicative** si

$$C_k(v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{ik}, \dots, v_{rk}) = \prod_{j=1}^{j=r} v_{jk} \quad (14)$$

La probabilité de perte est une métrique multiplicative.

Proposition 5 Relations d'ordre strict sur $G(V, E, M)$

Soient $v_1=(v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1j}, \dots, v_{1n})$ et $v_2=(v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2j}, \dots, v_{2n})$ deux vecteurs arc quelconques de $G(V, E, M)$ où chaque v_{ik} est la valeur de la métrique m_k pour le vecteur v_i . Chaque relation $<_k$ définie sur $G(V, E, M)$ par :

$$\forall v_1, v_2 \in E, \delta_k * v_{1k} < \delta_k * v_{2k} \Rightarrow v_1 <_k v_2$$

est une relation d'ordre strict.

La principale interprétation de *la proposition 5* est qu'il est toujours possible d'affirmer par rapport à une métrique quelconque lequel de deux vecteurs arcs est préférable à l'autre.

Proposition 6 Relations d'équivalence sur $G(V, E, M)$

Soient $v_1=(v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1j}, \dots, v_{1n})$ et $v_2=(v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2j}, \dots, v_{2n})$ deux vecteurs arc quelconques de $G(V, E, M)$ où chaque v_{ik} est la valeur de $S(m_k, z_k)$ pour v_i après mise à l'échelle. Chaque relation $=_k$ définie sur $G(V, E, M)$ par :

$$\forall v_1, v_2 \in E, v_{1k} = v_{2k} \Rightarrow v_1 =_k v_2$$

est une relation d'équivalence.

La principale interprétation de *la proposition 6* est qu'il est toujours possible d'affirmer par rapport à une métrique quelconque si la différence des valeurs observée sur deux vecteurs arcs est suffisamment négligeable pour qu'ils soient considérés comme étant équivalents. La précision z_k pour chaque métrique m_k doit être fixée de manière à garantir ce caractère négligeable.

Proposition 7 *Les relations d'ordre et d'équivalence énoncées aux propositions 5 et 6 s'appliquent également aux formes valuées des routes dans $G(V, E, M)$.*

A ce stade, nous pouvons comparer deux arcs ou deux routes quelconques considérées par rapport aux valeurs respectives d'une métrique. Il est nécessaire de disposer d'un outil qui puisse permettre de comparer deux arcs ou deux routes globalement par rapport à toutes les métriques.

Définition 16 Ordre de préférence sur $G(V, E, M)$

Soit $(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n)$ une suite contenant tous les éléments de M dans cet ordre.

Cette suite constitue *un ordre de préférence sur les métriques* considérées dans $G(V, E, M)$.

Toute permutation $o=(m'_1, m'_2, \dots, m'_i, \dots, m'_n)$ des éléments de M telle que pour tout $j \in \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$, $m'_j = m_{o(j)}$ définit un ordre de préférence sur $G(V, E, M)$.

Définition 17 Score sur $G(V, E, M)$ associé à un ordre de préférence o

Soient $o=(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n)$ un ordre de préférence dans $G(V, E, M)$,
 $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_n)$ les signatures respectives des métriques considérées dans cet ordre,
 $v=(v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$ un vecteur arc où chaque v_k est la valeur de $S(m_k, z_k)$ pour v dans l'ordre o
et $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ une suite décroissante de réels positifs dont la somme vaut 1.
On définit par Score de v associé à l'ordre de préférence o , notée $|v|_o$, la fonction :

$$| \quad | : G(V, E, M) \rightarrow \mathbb{R}, v \rightarrow |v|_o = \sum_{k=1}^{k=n} a_k * \delta_k * v_k \quad (15)$$

Proposition 8 Relation d'ordre strict sur $G(V, E, M)$ relative à un score $| \quad |_o$

Soient v_1 et v_2 deux arcs de $G(V, E, M)$.

La relation $<_o$ définie sur $G(V, E, M)$ par :

$$\forall v_1, v_2 \in E, |v_1|_o < |v_2|_o \Rightarrow v_1 <_o v_2$$

est une relation d'ordre strict.

Proposition 9 Relation d'équivalence sur $G(V, E, M)$ relative à un score $| \quad |_o$

Soient v_1 et v_2 deux arcs de $G(V, E, M)$.

La relation $=_o$ définie sur $G(V, E, M)$ par :

$$\forall v_1, v_2 \in E, |v_1|_o = |v_2|_o \Rightarrow v_1 =_o v_2$$

est une relation d'équivalence.

Proposition 10 Les relations d'ordre et d'équivalence énoncées aux propositions 8 et 9 s'appliquent également aux formes valuées des routes dans $G(V, E, M)$.

La fonction Score proposée à la définition 17 peut être utilisée pour obtenir un score sur un arc ou une route par rapport à l'ensemble des métriques.

Proposition 11 Calcul des coefficients associés un score $| \quad |_o$

Une suite décroissante $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ de n coefficients réels positifs dont la somme vaut 1 (avec $n > 1$) peut être obtenue en résolvant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{1+n}, \\ \frac{n(n-1)}{2} e = (1 - na_n), \\ e + a_{j+1} = a_j, \forall j < n \end{cases} \quad (16)$$

Où e est une valeur réelle qui représente l'écart entre les éléments de la suite.

3.2 Formulations du problème de la sélection des MPR

La plupart des approches pour la sélection de MPR, aussi bien pour optimiser la diffusion [30][70] que pour garantir la qualité de service [36][37][50][51][63] consistent essentiellement à proposer des heuristiques de sélection de MPR et à en évaluer les performances. Pour certaines des heuristiques proposées, les auteurs ne recherchent pas forcément à maintenir un nombre de MPR minimum. D'autres auteurs ajoutent un, deux voire trois critères de qualité de service lors de la sélection de MPR, soit en maintenant la contrainte d'un nombre minimum de MPR, soit en la relaxant. Tout ceci rend difficile une comparaison des solutions proposées. De plus, les auteurs ne montrent pas comment leurs solutions pourraient être généralisées à d'autres critères de qualité de service. En recourant à la représentation $G(V,E,M)$ présentée dans la section précédent et aux notations introduites en section 2.3.1, nous proposons une approche qui consiste à formuler sous forme de programme mathématique le problème de la sélection de MPR pour optimiser la diffusion. Nous proposons ensuite une formulation pour la sélection de MPR pour supporter la qualité de service. Enfin, nous proposons une formulation réalisant une synthèse de ces deux objectifs.

3.2.1 Les MPR pour optimiser la diffusion

Pour bien cerner le principal objectif à poursuivre lors de la sélection des MPR pour optimiser la diffusion, analysons ce qui se passe lorsqu'un nœud i émet un message A en broadcast :

- i émet une seule fois le message A . Nous comptons donc une transmission : $N_T(i)=1$.
- Parmi les voisins à un saut de i , seuls ceux qu'il a sélectionnés comme MPR peuvent retransmettre le message A . Si nous notons MPR_i par $MPR^1(i)$, le nombre de retransmissions de A sortant du voisinage à un saut est $N_T(N^1(i))=|MPR^1(i)|$.
- Lorsque ces messages retransmis parviennent au voisinage à deux sauts de i , c'est-à-dire $N^2(i)$, ils sont à nouveau retransmis uniquement par les MPR sélectionnés dans $N^2(i)$ par chaque nœud $j \in MPR^1(i)$. Si nous notons par $N^2(i) \cap MPR(j)$ chacun de ces ensembles, nous pouvons noter leur union $N^2(i) \cap (\cup_{j \in MPR^1(i)} MPR(j))$ par $MPR(MPR(i))$ ou $MPR^2(i)$. En considérant cette union ainsi que l'intersection avec le voisinage à deux sauts de i , on évite de compter des doublons.

Un bilan des retransmissions du message A partant de $N^2(i)$ montre que leur nombre $|N^2(i) \cap (\cup_{j \in MPR^1(i)} MPR(j))|$ est inférieur ou égal à $\sum_{j \in MPR^1(i)} |MPR(j)|$. Nous pouvons noter ceci par $N_T(N^2(i)) = |MPR^2(i)| \leq \sum_{j \in MPR^1(i)} |MPR(j)|$.

- Supposons que le voisinage le plus éloigné de i se trouve à $p+1$ sauts :

$$N^{(p+1)}(i) = \bigcup_{j \in N^p(i)} N^1(j) - \bigcup_{q=1}^{q=p} N^q(i) - \{i\} \text{ et } MPR^p(i) = N^p(i) \cap (\cup_{j \in MPR^{(p-1)}(i)} MPR(j))$$

On peut aisément déduire qu'au voisinage à p sauts de i , le nombre de retransmissions du message A vérifie la relation : $N_T(N^p(i)) = |MPR^p(i)| \leq \sum_{j \in MPR^{(p-1)}(i)} |MPR(j)|$.

On peut ainsi établir que le nombre total N_T de retransmissions du message A à travers le MANET vérifie les relations :

$$N_T = N_T(i) + N_T(N^1(i)) + N_T(N^2(i)) + \dots + N_T(N^p(i))$$

$$N_T = 1 + |MPR^1(i)| + |MPR^2(i)| + \dots + |MPR^p(i)|$$

$$N_T \leq 1 + |MPR^1(i)| + \sum_{j \in MPR^1(i)} |MPR(j)| + \dots + \sum_{j \in MPR^{(p-1)}(i)} |MPR(j)| \quad (17)$$

Pour être sûr de minimiser les retransmissions du message A émis en broadcast, l'idéal pour le nœud i serait de pouvoir minimiser tous les termes $|MPR^j(i)|$, $1 \leq j \leq p$. Le fonctionnement d'OLSR ne permet à chaque nœud qu'un contrôle très limité sur l'ensemble du réseau. En effet, chaque nœud ne connaît de manière exhaustive que les liaisons limitées à son second voisinage. Le nœud i ne peut donc minimiser de manière distribuée que le terme $|MPR^1(i)|$, c'est-à-dire le nombre de MPR qu'il sélectionne pour couvrir son voisinage à deux sauts.

L'équation (17) montre que la somme des cardinaux des ensembles de MPR sélectionnés par tous les nœuds impliqués dans la retransmission du message A constitue une borne supérieure sur le nombre total de retransmissions. Une manière de limiter le nombre de retransmissions consiste à minimiser cette borne supérieure, en d'autres termes à minimiser chaque terme $\sum_{j \in MPR^q(i)} |MPR(j)|$, $1 \leq q < p$. Ce qui revient au fait que chaque nœud du réseau minimise de manière distribuée l'ensemble de MPR qu'il sélectionne.

Pour ce faire, la station i résout une instance d'un problème très étudié et communément appelé le Minimum Set Covering Problem (MSCP) [33]. Le MSCP permet de modéliser un très grand nombre de problèmes académiques et industriels, notamment des problèmes d'affectation.

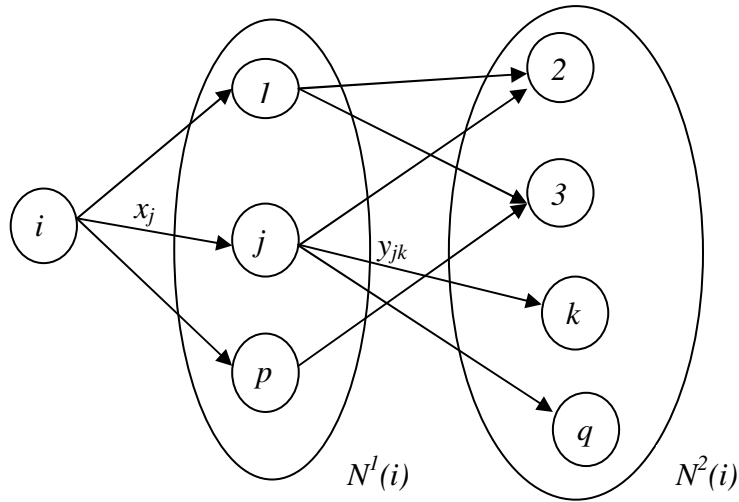


Figure 3.1 Illustration des variables pour la sélection des MPR

Comme cela est démontré par Garey et Johnson [34], le MSCP est un problème NP-dur. Les algorithmes utilisés dans la pratique pour le résoudre sont donc essentiellement des heuristiques. Un état de l'art intéressant sur ces algorithmes est proposé dans [75].

Nous avons modélisé la sélection des MPR [76] sous la forme d'un Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) [77]. Notre démarche vise également à faciliter le transfert ultérieur de nouvelles approches de résolution proposées pour le MSCP à la sélection des MPR.

Soit i le nœud qui calcule ses MPR. Les variables du problème (Q), également illustrées sur la figure 1, sont définies de la manière ci-après :

Chaque variable x_j modélise l'arc allant de i à j , où $j \in N^1(i)$.

Chaque variable y_{jk} modélise l'arc allant de $j \in N^1(i)$ à $k \in N^2(i) \cap N^1(j)$.

Les variables x_j et y_{jk} prennent la valeur 1 si l'arc correspondant est pris dans la solution de (Q), 0 sinon.

$$(Q) \quad \left[\begin{array}{l} \text{Minimize} \quad \sum_{j \in N^1(i)} x_j \\ \text{Subject to} \\ y_{jk} \leq x_j \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\ \sum_{j \in N^1(i)} y_{jk} \geq 1 \quad k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\ x_j, y_{jk} \in \{0,1\} \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i) \end{array} \right.$$

Nous notons par Q^* la solution obtenue en résolvant le problème (Q). Les contraintes de temps auxquelles est soumis le fonctionnement des protocoles de routage pour les MANET

tels qu'OLSR et la puissance de calcul limitée des stations susceptibles de faire partie d'un MANET imposent le recours à des algorithmes d'approximation rapides et à faible complexité. La résolution du modèle proposé à l'aide d'algorithmes exacts, en recourant notamment à des solveurs tels que *CPLEX* [78] peut néanmoins servir à l'évaluation de la qualité des solutions obtenues par les heuristiques. L'idée consiste à résoudre exactement des instances du problème pour obtenir des bornes inférieures sur le nombre de MPR, puis se servir de ces résultats comme référence pour évaluer les heuristiques.

3.2.2 Les MPR pour la qualité de service

Lorsqu'on aborde le problème de la sélection de MPR pour optimiser la diffusion, tous les nœuds du réseau se voient assigner exactement le même objectif, à savoir chacun doit minimiser le nombre de MPR qu'il sélectionne. Cet objectif unique et commun place automatiquement tous les nœuds dans un schéma de coopération.

Le problème se présente différemment en ce qui concerne la qualité de service. En effet, on distingue dans un premier temps deux principaux cas de figure :

- Dans le premier cas, tous les nœuds ont les mêmes contraintes en termes de qualité de service. C'est notamment le cas lorsque le MANET est spécialement mis en place pour répondre à un objectif précis et que tous les nœuds du réseau exécutent les mêmes applications en même temps. 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. On retrouve un schéma coopératif analogue à celui lié à l'optimisation de la diffusion.
- Dans le second cas, nous considérons un MANET au sens le plus large. Les nœuds exécutent des applications différentes ayant des contraintes en qualité de service sur des métriques différentes. Considérons dans ce contexte deux nœuds x et y situés à plusieurs sauts l'un de l'autre et qui communiquent dans le cadre d'une application. Ces deux nœuds ont donc des besoins en qualité de service sur les mêmes métriques. Deux cas triviaux suffisent à illustrer le problème :
 - Si aucun des nœuds situés sur les routes reliant x à y ne se base sur exactement les mêmes métriques de QoS que ces deux derniers, il n'y a aucun moyen de garantir que les paquets transmis entre x et y transiteront par des routes calculées pour garantir la QoS requise.

- L'idéal, et c'est le second cas trivial, serait que tous les nœuds intermédiaires sur les routes de x à y prennent également en compte exactement les mêmes métriques de QoS que x et y . L'idée consiste donc à faire entrer les nœuds dans un schéma coopératif en imposant à chaque nœud de prendre en compte toutes les métriques de qualité de service liées aux applications qu'il exécute ainsi que celles liées aux applications dont il assure la transmission de paquets.

Les deux observations ci-dessus nous amènent à une première conclusion intéressante :

Proposition 12 *A moins que les nœuds d'un MANET exécutent la même application ayant des exigences sur une seule métrique de qualité de service, la sélection des MPR pour la qualité de service dans un MANET est forcément un problème multicritère.*

Considérant les métriques $(m_1, m_2, \dots, m_g, \dots, m_n)$, les variables x_j et y_{jk} illustrées en figure 3.1 sont réécrites respectivement de la manière suivante : $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jg}, \dots, x_{jn})$ et $y_{jk} = (y_{jk1}, y_{jk2}, \dots, y_{jkg}, \dots, y_{jkn})$, avec $x_{jg} = \text{val}(m_g)$ et $y_{jkg} = \text{val}(m_g)$ sur les arcs correspondants. On obtient ainsi le modèle multicritère approché suivant où la fonction objectif est un vecteur dont les composantes sont les objectifs associés à chaque critère respectivement [79]:

$$(MQ) \left[\begin{array}{l} \text{Maximize } (f^1, f^2, \dots, f^g, \dots, f^n) \quad f^g = \sum_{j \in N^1(i)} \left(\sum_{k \in N^2(i) \cap N^1(j)} \delta_g^* S(C_g(x_{jg}, y_{jkg}), z_g^*) y_{jk} \right) \\ \text{Subject to} \\ y_{jk} \leq x_j \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\ \sum_{j \in N^1(i)} y_{jk} \geq 1 \quad k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\ \sum_{j \in N^1(i)} x_j \leq Q^* + \theta \\ x_j, y_{jk} \in \{0, 1\} \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i) \end{array} \right.$$

La constante θ est le nombre de noeuds qu'on s'autorise à ajouter à la solution Q^* de (Q) et qui représente le nombre de MPR sélectionnés en vue d'optimiser la diffusion. Ceci peut s'avérer intéressant dans le cas où une amélioration significative de la qualité des liaisons retenues pourrait en résulter sans dégrader l'optimisation de la diffusion obtenue par Q^* .

Cette formulation (MQ) est une formulation approchée d'un problème plus général. En effet, la formulation rigoureuse serait un modèle multiobjectif à $|N^2(i)|+1$ objectifs, à savoir : $|N^2(i)|$ routes multicritère reliant i respectivement à chacun de ses voisins à deux sauts et la minimisation du nombre de MPR. Il pourrait être formulé ainsi :

$$\begin{array}{l}
 \text{(MQG)} \quad \left[\begin{array}{l}
 \text{Maximize } (f^{1k}, f^{2k}, \dots, f^{gk}, \dots, f^{nk}) \quad k \in N^2(i), f^{gk} = \delta_g * S(C_g(x_{jg}, y_{jkg}), z_g) \\
 \text{Subject to} \\
 y_{jk} \leq x_j \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\
 \sum_{j \in N^1(i)} y_{jk} \geq 1 \quad k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\
 \sum_{j \in N^1(i)} x_j \leq Q^* + \theta \\
 x_j, y_{jk} \in \{0,1\} \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i)
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

En pratique, il n'existe pas de méthodes traitant des problèmes avec autant d'objectifs. Nous faisons remarquer que l'objectif correspondant à la minimisation du nombre de MPR a été transformé en contrainte dans la formulation proposée.

3.3 Conclusion

Dans le cadre de nos contributions, ce chapitre a été consacré aux aspects liés à la modélisation des réseaux mobiles ad hoc. Nous y avons proposé une représentation pour les MANET ainsi qu'un ensemble de concepts dont la prise en compte est utile lors de la conception des mécanismes dédiés au routage à QoS.

Abordant le problème de l'optimisation de la diffusion, nous avons proposé un modèle du problème sous-jacent lorsque la technique des MPR est utilisée à cette fin. Nous avons ensuite étendu ce modèle de manière à prendre en compte les métriques de qualité de service lors de la sélection des MPR. Cette démarche est une synthèse de l'approche que nous défendons, à savoir celle qui consiste à traiter en même temps l'ensemble des problèmes liés à la performance du routage à qualité de service dans les MANET.

Une résolution exacte des modèles proposés serait très coûteuse pour les stations d'un MANET. Néanmoins, elle pourrait servir en phase de conception pour évaluer les heuristiques proposées. Elle permet également de présenter les problèmes d'optimisation rencontrés dans les MANET sous une forme qui facilite le transfert de nouvelles méthodes proposées notamment dans le domaine de la recherche opérationnelle.

4

Une heuristique générique pour la sélection multicritère des MPR

- 4.1 *Une heuristique générique pour la sélection des MPR*
 - 4.1.1 Objectifs, contraintes et options
 - 4.1.2 Présentation de l'heuristique *QH*
 - 4.1.3 Contribution à l'amélioration de *MAXP*
- 4.2 *Evaluation de l'heuristique QH*
 - 4.2.1 Le contexte des évaluations
 - 4.2.2 Evaluation comparative de *QH*
 - 4.2.3 Evaluation de l'efficacité de *QH*
- 4.3 *Conclusion*

4 Une heuristique générique pour la sélection multicritère des MPR

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la sélection des MPR utilisés dans le protocole OLSR aussi bien pour optimiser la diffusion que pour permettre le calcul de routes à qualité de service. Nous proposons une heuristique générique qui traite ce problème indépendamment du nombre et de la nature des métriques considérées. Nous présentons enfin les évaluations qui servent de base de comparaison entre notre heuristique et les propositions antérieures.

4.1 Une heuristique générique pour la sélection des MPR

4.1.1 Objectifs, contraintes et options

Il existe un lien entre les objectifs poursuivis et les contraintes à respecter par l'heuristique à proposer. L'exposé de ces deux aspects ainsi que des choix opérés pour les satisfaire se fera donc de manière à clarifier le mieux possible les liens entre eux. Sans forcément suivre un ordre de priorité, les objectifs poursuivis dans la conception de l'heuristique sont :

- **Le maintien de l'optimisation de la diffusion** : c'est la raison d'être des MPR. La contrainte qui en résulte est que le nombre de MPR doit être le plus proche possible du minimum, avec si possible un écart borné.

Cet objectif peut être atteint grâce à un paramètre qui indique le nombre de MPR qui peuvent être ajoutés au résultat obtenu par le *simple greedy* (SG). Sa valeur est fixée de manière distribuée par chaque nœud en fonction de son voisinage ;

- **Le caractère générique par rapport aux métriques de QoS** : l'heuristique doit pouvoir sélectionner les MPR en prenant en compte les contraintes de qualité de service, indépendamment du nombre et des types des métriques considérées. La représentation $G(V,E,M)$ proposée au le chapitre précédent fournit les notations et les concepts nécessaires à la réalisation cet objectif ;

- **Une faible complexité** : au vu de la fréquence avec laquelle les MPR sont calculés et les types de terminaux sur lesquels elle peut être déployée, l'heuristique doit consommer peu de ressources pour ne pas entraîner une consommation rapide de l'énergie. Au vu du temps qui s'écoule entre deux réceptions de messages HELLO successifs, son exécution doit être la plus rapide possible. Les algorithmes de type glouton tels que le *simple greedy* obtiennent certes une approximation un peu moins précise, mais ils ont le mérite d'être très rapides. Il n'est pas surprenant que la quasi-totalité des algorithmes présentés dans ce mémoire pour la sélection des MPR soient de ce type. Afin de pouvoir contrôler le temps d'exécution, il peut être fixé un temps limite T_{max} au bout duquel l'exécution de l'heuristique doit être interrompue.

- **La qualité des liaisons établies avec chaque nœud du second voisinage via les MPR** : cet objectif pose un problème crucial de choix lorsque plusieurs métriques doivent être prises en compte. Considérons un nœud i qui sélectionne des MPR, un nœud $k \in N^2(i)$, l'ensemble $\{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_p\} \subset N^2(i) \cap N^1(k)$ de candidats MPR susceptibles de relier i à k , et $\{m_1, m_2, \dots, m_h, \dots, m_n\}$ l'ensemble des métriques.

Les métriques étant parfois antagonistes, il n'est pas certain qu'une route $i \rightarrow x_j \rightarrow k$ présente à elle seule les meilleures valeurs pour toutes les métriques simultanément. Une question importante est celle de savoir s'il faut choisir un seul MPR qui permettrait d'obtenir la route de meilleur compromis ou s'il faut choisir en tant que MPR chaque nœud x_j qui permettrait d'obtenir la meilleure route pour l'une quelconque des métriques.

Dans la première approche, on prend le risque que la route associée au MPR choisi présente des valeurs très médiocres pour certaines métriques. Dans la seconde approche, on prend le risque qu'aucun des MPR choisis ne puisse offrir une route présentant de bonnes valeurs pour plus d'une métrique.

Nous avons opté pour la seconde approche pour trois raisons :

- La première est que le risque de rater la meilleure route par rapport à une métrique quelconque m_h est plus élevé lorsque le nœud i ne choisit qu'un seul MPR plutôt que lorsqu'il en choisit plusieurs pour atteindre k ;
- La seconde est que le choix de MPR redondants est déjà pris en compte dans la spécification d'OLSR sous le terme de coverage. Il suffit donc de définir une valeur R_{max} associée et qui définit le nombre maximum de MPR redondants. Pour

4.1 Une heuristique générique pour la sélection des MPR

résoudre le problème de collisions au niveau de l'interface du récepteur k , il suffirait de maintenir une liste ordonnée $List_k$ des MPR redondants qui permettent à i d'atteindre k . L'ordre choisi peut être l'ordre de préférence o défini sur les métriques. Les indices des métriques peuvent ainsi servir d'indices d'accès à la liste $List_k$. Lorsque le nœud i déclare les MPR qu'il a sélectionnés, il déclare également les numéros d'ordre associés. Lorsqu'un nœud x_j sélectionné en tant que MPR par i reçoit un message de diffusion provenant de ce dernier, il calcule un temps de latence en fonction de son numéro d'ordre avant de le retransmettre.

- La dernière raison peut s'expliquer de la manière suivante : dans OLSR, la sélection des MPR et le calcul de routes sont effectués périodiquement, indépendamment d'une demande de route spécifique. Au moment où le nœud i sélectionne ses MPR, il ne sait pas forcément pour quels types de trafic il assurera la transmission.

Plutôt que de consommer la puissance de calcul et de l'énergie à rechercher un MPR unique x_j qui réalise le meilleur compromis entre les différentes métriques pour atteindre k , il vaut mieux sélectionner pour chaque métrique le candidat MPR qui permet d'obtenir la meilleure valeur, quitte à en sélectionner plusieurs. Si x_j , un des MPR sélectionnés, permet d'obtenir la meilleure valeur pour plusieurs métriques à la fois, il pourra alors assurer la transmission du trafic spécifiant des contraintes de QoS pour ces mêmes métriques.

En généralisant cette idée à l'ensemble du réseau, on augmente la probabilité que les liaisons ayant les meilleures valeurs pour plusieurs métriques simultanément fassent partie des routes à qualité de service calculées sur la base de ces mêmes métriques. Bien entendu, on prend le risque de ne pas disposer de ce type de routes dans certaines configurations.

4.1.2 Présentation de l'heuristique QH

Afin de présenter l'heuristique QH proposée, reprenons la représentation $G(V,E,M)$ du MANET proposé au chapitre 3. Un bilan des éléments introduits en section 4.1.1 ci-dessus, fait apparaître les paramètres ci-après :

- θ : le nombre de MPR qui peuvent être ajoutés arbitrairement ;
- T_{max} : la durée d'exécution à l'issue de laquelle l'heuristique doit être interrompue ;

- R_{max} : le nombre maximum de nœuds redondants. Par défaut, nous suggérons que cette valeur soit le nombre de métriques, donc $R_{max} = n$;
- $List_k$: Pour chaque nœud k du voisinage à deux sauts, on conserve la liste des MPR qui ont été choisis pour l'atteindre en fonction de chacune des métriques considérées. Pour simplifier, elle est indicée par les indices des métriques dans l'ordre de préférence $o = \{m_1, m_2, \dots, m_g, \dots, m_n\}$ correspondant.
- On introduit le tableau COV défini par :

$$\forall j \in N^1(i), k \in N^2(i), COV[j] = \sum Z_{jk} * Z_{jkg},$$

où Z_{jkg} représente le nombre de métriques pour lesquelles j est choisi comme MPR par i pour couvrir k , et Z_{jk} est une variable binaire telle que $Z_{jk} \leq Z_{jkg}$.

En d'autres termes, Z_{jk} vaut 1 si j est choisi pour atteindre k par rapport à au moins une métrique, et 0 sinon.

L'heuristique QH fait appel à une procédure proposée dans [76] et qui s'apparente aux algorithmes de correction de marquage proposés pour traiter les problèmes de chemins multicritères dans les graphes [74]. Le fonctionnement de cette procédure peut être résumé comme suit : à chaque fois qu'un nœud est sélectionné en tant que MPR, tous les nœuds du second voisinage qu'il permet d'atteindre sont revisités y compris ceux qui sont déjà couverts par d'autres MPR. Une comparaison est alors faite entre le MPR actuel et les précédents pour chaque métrique de qualité de service afin de déterminer lequel propose la meilleure route pour atteindre la destination. Elle sera notée $CORRECTION_MARQUAGE(j : \text{nœud})$.

Algorithme 5 : $CORRECTION_MARQUAGE(j : \text{nœud})$: BOOLEEN

```

Entrées :  $N^1(j), N^2(i), COV, \theta$ 
1   début
2   RETOUR = FAUX
3   POUR  $k \in (N^1(j) \setminus N^2(i))$  FAIRE
4     POUR  $g=1$  A  $g=n$  FAIRE
5        $h = List_k[g]$ 
6       SI  $((i,h), (h,k)) <_g ((i,j), (j,k))$  ALORS
7          $List_k[g] = j$ 
8          $COV[h] = COV[h] - 1$ 
9          $COV[j] = COV[j] + 1$ 
10      RETOUR = VRAI
11     SI  $COV[h] = 0$  ALORS
12        $MPR_i = MPR_i \setminus \{h\}$ 
13        $\theta = \theta + 1$ 
14     FIN SI
15   FIN POUR
16   FIN POUR
17   RENVOYER(RETOUR)

```

Algorithme 6 : QH

```

Entrées :  $N^1(i), N^2(i)$ 
1      début
2      Etape 1:  $\underline{N}^2(i)=N^2(i)$ 
3           $MPR_i=MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : \exists k \in N^2(i), (j,k) \in E \text{ ET } \forall (q,k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\} = 1\}$ 
4          POUR  $j \in MPR_i$  FAIRE
5              POUR  $k \in (N^1(j) \cap \underline{N}^2(i))$  FAIRE
6                  POUR  $g=1$  A  $g=n$  FAIRE
7                       $List_k[g]=j$ 
8                  FIN POUR
9               $COV[j]=COV[j]+n$ 
10             FIN POUR
11              $CORRECTION\_MARQUAGE(j)$ 
12              $\underline{N}^2(i)=\underline{N}^2(i) \setminus N^1(j)$ 
13             FIN POUR
14      Etape 2: TANT QUE  $\underline{N}^2(i) \neq \emptyset$  FAIRE
15           $A = \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : \forall (j,k) \in E : k \in \underline{N}^2(i)\} = \text{MAX}\{\forall (q,p) \in E : p \in \underline{N}^2(i)\}, \forall q \in (N^1(i) \setminus MPR_i)\}$ 
16           $MPR_i=MPR_i \cup \{j \in A : \forall (i,j), \omega = \text{MAX}\{\forall (i,p)\}, \forall p \in A\}$ 
17          POUR  $k \in (N^1(j) \cap \underline{N}^2(i))$  FAIRE
18              POUR  $g=1$  A  $g=n$  FAIRE
19                   $List_k[g]=j$ 
20              FIN POUR
21               $COV[j]=COV[j]+n$ 
22              FIN POUR
23               $CORRECTION\_MARQUAGE(j)$ 
24               $\underline{N}^2(i)=\underline{N}^2(i) \setminus N^1(j)$ 
25          FIN TANT QUE
26      Etape 3 : TANT QUE ( $DUREE\_EXECUTION < T_{max}$ ) ET ( $\theta > 0$ ) ET ( $MPR_i \neq N^1(i)$ ) FAIRE
27           $A = \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : \forall (i,j), \omega = \text{MAX}\{\forall (i,p)\}, \forall p \in N^1(i) \setminus MPR_i\}$ 
28          SI  $CORRECTION\_MARQUAGE(A[1])$  ALORS
29               $MPR_i=MPR_i \cup \{A[1]\}$ 
30               $\theta=\theta-1$ 
31          FIN SI
32      FIN TANT QUE

```

Afin de permettre au lecteur de bien saisir les mécanismes mis en œuvre dans *QH* pour atteindre les objectifs qui ont été fixés, examinons son fonctionnement. Les étapes 1 et 2 sont directement inspirées du *simple greedy (SG)* [31]. Une image qui peut servir à illustrer le fonctionnement de *QH* est la suivante : un entrepreneur qui doit procéder à la démolition d'une centaine de petites maisons ($N^2(i)$), dispose de 5 minutes (T_{max}) pour choisir entre 20 et 25 ouvriers (MPR_i , $\theta=5$) dans un groupe de 80 ($N^1(i)$) demandeurs d'emploi. Les maisons sont susceptibles de contenir de 1 à 4 agents allergiques (*les métriques*), et l'entrepreneur doit faire attention à la sensibilité de chaque ouvrier par rapport à chaque agent avant de l'affecter à une maison. Plusieurs ouvriers peuvent se grouper au maximum par 4 (R_{max}) pour démolir une maison, et un ouvrier peut se voir assigné la tâche de participer à la démolition de plusieurs maisons sur le chantier. Comment peut-il procéder pour finaliser son recrutement dans les 5 minutes ?

Voici ce que QH lui propose de faire : sélectionner successivement 20 ouvriers sur les éléments de leur morphologie permettant de penser qu'ils font de bons démolisseurs (taille, musculature, âge) en bonne santé (non fumeur, sobre, l'air en forme). C'est ce que fait QH en choisissant le prochain MPR sur base du score $|x|_0$. Au même moment que l'entrepreneur sélectionne un ouvrier, il lui pose rapidement quelques questions pour décider de la maison à laquelle il l'affecte. Dans QH , ceci correspond à la correction de marquage. Au début, c'est facile parce qu'il y a encore beaucoup de maisons auxquelles aucun ouvrier n'a été affecté. C'est ce qui arrive à l'étape 1 de QH . Au fur et à mesure qu'il lui reste peu d'ouvriers à affecter et qu'il y a déjà des ouvriers affectés à la plupart des maisons, notre entrepreneur est amené à opérer des changements d'affectation, à renoncer à certains ouvriers qu'il avait choisis au départ. En effet, après les réaffectations successives, il ne peut plus les affecter à aucune maison tout en respectant les critères fixés au départ. C'est ce que fait la correction de marquage à l'étape 2 de QH . Au moment où il finit ses affectations, l'entrepreneur n'a finalement gardé que 19 ouvriers. Il a gagné un employé. S'il lui reste du temps, il peut se permettre de regarder dans la foule qui pourrait aller renforcer les équipes affectées à certaines maisons. Mais il n'a pas le droit de dépasser le nombre de 25 ouvriers au total. C'est ce que fait QH à l'étape 3.

Voyons maintenant techniquement ce que fait l'heuristique QH lors de la sélection des MPR.

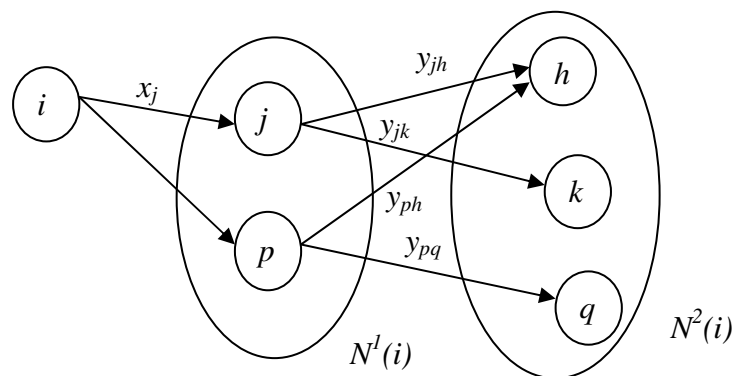


Figure 4.1 Exemple pour décrire l'étape 1 de QH

A l'étape 1, QH sélectionne comme MPR chaque nœud de $N_1(i)$ qui est l'unique intermédiaire vers au moins un nœud dans $N_2(i)$. Dans l'exemple de la figure 4.1, on a donc :

- 1 Le nœud j est choisi pour couvrir k : $MPR_i = \{j\}$;
- 2 Mise à jour des listes : $List_k = \{j, j, \dots, j\}$, $List_h = \{j, j, \dots, j\}$;
- 3 La procédure $CORRECTION_MARQUAGE(j)$ n'apporte aucune modification ;
- 4 $COV[j] = 2n$, $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus \{k, h\}$;

- 5 Le nœud p est choisi pour couvrir q : $MPR_i = \{j,p\}$;
- 6 Deux nouvelles listes sont mises à jour : $List_q = \{p,p,\dots,p\}$, $COV[p] = n$, $\underline{N}^2(i) = \underline{N}^2(i) \setminus \{q\}$;
- 7 La procédure $CORRECTION_MARQUAGE(j)$ est appelée ;

Arrêtons un instant le déroulement pour analyser le fonctionnement de cette procédure. Le nœud h peut être atteint potentiellement par l'intermédiaire de j ou de p ou des deux :

- Supposons qu'il existe une seule métrique d'indice g pour laquelle $((i,j),(j,h)) <_g ((i,p),(p,h))$, alors les listes modifiées le sont comme suit :

$$List_h = \{j,j,\dots,p,\dots,j\}, COV[j] = COV[j] - 1, COV[p] = COV[p] + 1.$$

On obtiendrait des changements analogues pour jusqu'à $n-1$ métriques, auquel cas et en supposant que seule la métrique d'indice g vérifie $((i,p),(p,h)) <_g ((i,j),(j,h))$, $List_h = \{p,p,\dots,j,\dots,p\}$, $COV[j] = COV[j] - n + 1$, $COV[p] = COV[p] + n - 1$;

- Si l'inégalité $((i,j),(j,h)) <_g ((i,p),(p,h))$ n'est vérifiée pour aucune métrique, alors aucune liste n'est modifiée par la procédure $CORRECTION_MARQUAGE$;
- Si l'inégalité $((i,j),(j,h)) <_g ((i,p),(p,h))$ est vérifiée pour toutes les métriques, les listes sont modifiées comme suit :

$$List_h = \{p,p,\dots,p,\dots,p\}, COV[j] = COV[j] - n, COV[p] = COV[p] + n.$$

Dans cet exemple, j reste dans MPR_i parce qu'il reste le seul intermédiaire pour atteindre k . Ceci explique qu'aucun nœud n'est exclu de MPR_i à l'étape 1.

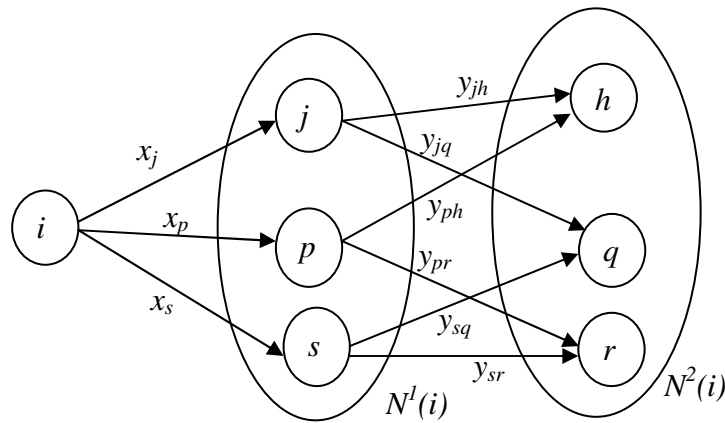


Figure 4.2 Exemple pour décrire les étapes 2 et 3 de QH

Pour ne pas répéter inutilement les éléments déjà illustrés à l'étape 1, considérons l'exemple sur la figure 4.2 et supposons trois choses :

- 1 que la double inégalité $(i,s) <_o (i,p) <_o (i,j)$ est vérifiée ;

2 que les $2n$ inégalités $((i,j),(j,h)) <_g ((i,p),(p,h))$ et $((i,j),(j,q)) <_g ((i,s),(s,q))$ (avec $g=1,\dots,n$) soient vérifiées ;

3 T_{max} est fixé suffisamment grand pour permettre de franchir l'étape 3 et $\theta > 0$.

Les trois nœuds ayant le même degré 2, la première supposition suffit pour que j soit sélectionné comme premier MPR : $MPR_i = \{j\}$. Les nœuds h et q sont couverts et $COV[j] = 2n$.

Les nœuds p et s ont maintenant le même degré 1 par rapport au seul nœud non couvert r . Toujours sur la base de la première proposition, p est choisi comme MPR en second d'où $MPR_i = \{j,p\}$. Le nœud r est alors couvert par p et $COV[p] = n$.

Suite aux n premières inégalités de la supposition 2, l'appel à $CORRECTION_MARQUAGE(p)$ entraîne que h est désormais couvert par p , d'où $COV[j] = n$ et $COV[p] = 2n$. Tous les nœuds sont maintenant couverts, la phase 2 de QH est maintenant terminée.

La vérification du respect de la contrainte de temps T_{max} n'est effectuée qu'à partir du début de l'étape 3, car de cette façon on est sûr que tout nœud du second voisinage est couvert par au moins un MPR. L'étape 3 est donc une étape d'exploration facultative dont le but est essentiellement de tenter d'améliorer la solution obtenue à la fin de la partie de l'heuristique qui s'apparente au *simple greedy* (SG).

L'unique nœud de $N^l(i)$ qui n'a pas encore été traité est s , il est donc choisi. Suite aux n dernières inégalités de la supposition 2, l'appel à $CORRECTION_MARQUAGE(s)$ entraîne que q est désormais couvert par p , d'où $COV[j] = 0$ et $COV[s] = n$. Le nœud j est alors retiré de MPR_i . L'ensemble de MPR conserve donc la même taille, mais on observe une amélioration de la qualité des liaisons par lesquelles les nœuds du second voisinage sont atteints.

Un exemple présenté dans [76] montre comment la procédure de correction de marquage permet de réduire le nombre de MPR sélectionnés avant même la fin de l'étape 2 tout en améliorant la qualité obtenue avec les liaisons retenues par rapport à une métrique. Nous ne référons pas cet exercice dans cette thèse, parce que du fait du nombre des liaisons impliquées dans l'exemple initial [76], sa généralisation à n métriques occasionnerait un nombre important de suppositions au risque de perdre en clarté.

4.1.3 Contribution à l'amélioration de *MAXP*

Dans nos travaux présentés dans [80], nous mettons en évidence une insuffisance dans l'un des tests opérés dans l'algorithme *MAXP* [63]. La solution du problème à l'origine de cette

insuffisance explique en partie l'amélioration obtenue par l'algorithme que nous proposons dans [80], alors que ce dernier recourt à un nombre de MPR très inférieur à celui de *MAXP*. Considérons le nœud q dans l'exemple de la figure 4.3.

Notons par $P(x,y)$, comme dans la présentation de *MAXP*, la probabilité de réception correcte sur un arc (x,y) .

Lorsque le test de couverture suivant $(1 - \prod_{t \in N^1(q) \cap MPR_i} (1 - P(t, q))) \geq P_{min}$ est fait à l'étape 2 de *MAXP*, il ne considère la valeur de la probabilité de réception correcte de messages que sur les arcs allant respectivement des MPR j, p et s au nœud q .

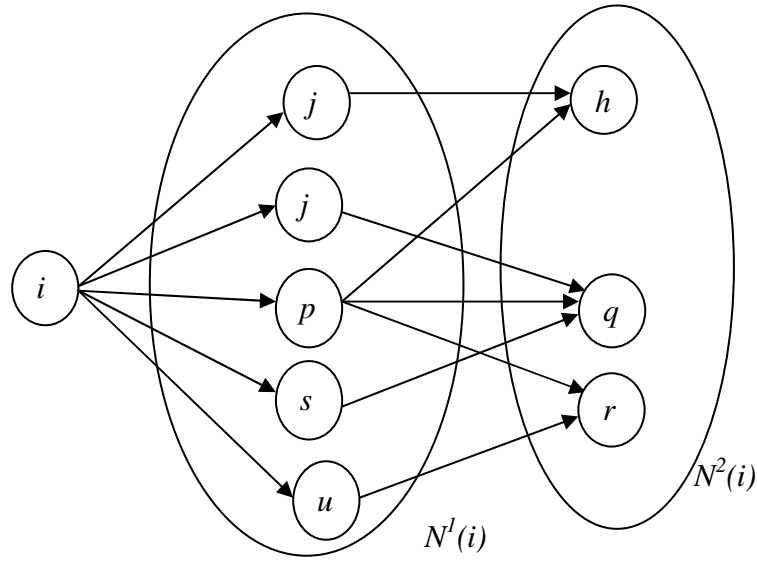


Figure 4.3 Exemple pour illustrer l'amélioration de *MAXP*

Dans [80], nous faisons remarquer que le test de couverture aurait dû porter sur les chaînes allant de i à q et transitant par chaque MPR. Le test qui aurait dû être fait est le suivant :

$$1 - \prod_{t \in N^1(q) \cap MPR_i} (1 - P(i, t) * P(t, q)) \geq P_{min} \quad (18)$$

En prenant également en compte la qualité des liaisons allant de i au candidat MPR, et en ne retenant comme MPR redondants que ceux qui contribuent à augmenter le membre de gauche dans l'inégalité ci-dessus, de meilleurs résultats peuvent être obtenus avec un nombre de MPR moins élevé. Les résultats obtenus dans [80] en apportent la preuve.

4.2 Evaluation de l'heuristique QH

Dans la plupart des travaux sur la sélection des MPR, que ce soit pour l'optimisation de la diffusion ou pour la garantie de la qualité de service, les performances des algorithmes sont évaluées uniquement à travers celles du protocole de routage. Il est nécessaire d'évaluer d'abord séparément l'algorithme pour se rendre compte des changements qu'il apporte au traitement du problème sur lequel il est appliqué. Ainsi lorsqu'on évaluera le protocole en y ayant intégré l'algorithme, si les améliorations escomptées ne sont pas observées, on saura quels aspects nécessitent plus d'investigations afin d'en découvrir les raisons. Cette façon d'évaluer peut permettre de découvrir des hypothèses erronées sur le comportement du protocole ou du réseau qui auraient pu être faites lors de la conception de l'algorithme.

Pour bien illustrer notre propos, supposons :

- que l'on observe une hausse du taux de collisions sur les interfaces de plusieurs nœuds ayant reçu de deux voisins différents la même copie d'un message de broadcast ;
- que ces observations aient conduit à l'hypothèse selon laquelle il faut éviter la redondance.

Dans un nouvel algorithme de sélection de MPR écrit dans le but de réaliser un certain nombre d'objectifs, on prend alors le soin d'éviter autant que possible la sélection de MPR redondants. L'algorithme est intégré au protocole, mais curieusement on observe que le taux de collisions a faiblement baissé alors que celui des messages de diffusion non reçus a beaucoup augmenté. Peut-on affirmer que lien entre cette observation et le fait d'avoir évité le recours à la redondance sera immédiat ? Rien n'est moins sûr. On peut supposer que les topologies des réseaux ayant servi à l'évaluation du protocole sont telles que l'algorithme n'a que faiblement réduit la redondance pour les nœuds sur lesquels les collisions survenaient, et qu'au contraire il a réussi à fortement la réduire pour des nœuds qui ne recevaient les messages qu'à la retransmission par le second MPR redondant. Ce sont précisément ces derniers nœuds qui ont occasionné la hausse du taux de messages non reçus. Dans cet exemple, l'erreur commise a été de faire l'hypothèse selon laquelle la redondance ne peut avoir que des effets néfastes. Une évaluation séparée de l'algorithme sur des topologies présentant des niveaux de redondance différents aurait pu mettre en évidence des éléments permettant de déceler l'erreur commise. C'est la démarche adoptée dans nos évaluations.

A notre connaissance, la proposition sur la QoS dans les MANET prenant en compte le plus grand nombre de métriques est l'algorithme proposé dans [73] pour le calcul de routes. Cet algorithme prend en compte quatre métriques, à savoir le débit B , le délai D , le taux de pertes P et le nombre de sauts. L'heuristique QH proposée sera donc évaluée sur quatre métriques. Etant donné que pour la sélection de MPR toutes les routes sont de longueur 2, la quatrième métrique considérée dans nos évaluations est le Willingness des nœuds noté W et qui permet de prendre en compte les aspects liés à l'utilisation efficient de l'énergie. Plutôt que le taux de pertes, nous utiliserons la probabilité de transmission correcte P . Une première évaluation comparative est menée entre QH et les autres heuristiques présentées au chapitre 2.

QH étant la seule à prendre en considération quatre métriques simultanément tout en optimisant la diffusion, la première comparaison n'est pas équitable. Une seconde évaluation est menée pour mesurer l'amélioration apportée par QH sur chaque métrique, d'abord comparativement à une heuristique qui ne la prend pas en compte, puis comparativement à un algorithme exact qui n'optimise que cette métrique. Dans le premier cas, on vérifie le gain apporté par rapport aux algorithmes utilisés dans les protocoles en mode best effort, dans le second cas le but est de mesurer l'écart par rapport à la valeur optimale pour chaque métrique.

4.2.1 Le contexte des évaluations

Les critères d'évaluation

QH est principalement évaluée sur les critères liés aux objectifs à l'origine de sa conception :

- **Le temps d'exécution** : toutes les heuristiques évaluées sont exécutées exactement sur les mêmes instances, et leurs temps d'exécution sont sauvegardés. Dans les implémentations d'OLSR couramment utilisées, la boucle principale dure 5 secondes. Nous avons utilisé cette valeur comme durée maximale : $T_{max}=5$ secondes. Dans OLSR, ceci correspond au temps qui s'écoule durant la réception de deux messages HELLO et un message TC dans OLSR. Comme le montreront les évaluations, ce temps relativement long n'est quasiment jamais atteint par l'heuristique proposée. Il fait uniquement office de garde-fou et peut être augmenté ou réduit dynamiquement.
- **Le nombre de MPR** : cette donnée obtenue pour chaque heuristique sera comparée au nombre de MPR obtenu par le *simple greedy (SG)* pour avoir une idée sur l'écart à l'optimum, et au résultat de 3626 pour avoir une idée sur le trafic additionnel qu'elle pourrait introduire dans les implémentations actuelles d'OLSR.

- **La moyenne des meilleures valeurs obtenues pour chaque métrique via les MPR :**
 Considérons l'ensemble de MPR obtenu par chaque heuristique. Pour chaque noeud y de $N^2(i)$, notons par MPR_y^B , MPR_y^D et MPR_y^W , le MPR qui permet de joindre y avec la meilleure valeur respectivement pour le débit, le délai et le Willingness.

Notons par $P(x, y)$ la probabilité de transmission correcte entre x et y .

- Le débit moyen : $\frac{\sum_{y \in N^2(i)} \text{MIN}\{B(i, MPR_y^B), B(MPR_y^B, y)\}}{|N^2(i)|}$;
- Le délai moyen : $\frac{\sum_{y \in N^2(i)} D(i, MPR_y^D) + D(MPR_y^D, y)}{|N^2(i)|}$;
- Le Willingness moyen : $\frac{\sum_{y \in N^2(i)} MPR_y^W}{|N^2(i)|}$;
- La probabilité de transmission correcte moyenne : le cas de cette dernière métrique est particulier. En effet, il faut cumuler les valeurs des probabilités obtenues grâce à tous les MPR en liaison avec y en utilisant l'équation 18 :

$$\frac{\sum_{y \in N^2(i)} 1 - \prod_{t \in N^1(y) \cap MPR_i} (1 - P(i, t) * P(t, y))}{|N^2(i)|}$$

Les instances de réseaux utilisées

Dans toutes les évaluations, le réseau est modélisé par un espace carré de $400m \times 400m$. D'une instance à l'autre, le nombre de noeuds varie de 160 à 8000 dans le but d'obtenir différentes densités spatiales de noeuds comme illustré dans le tableau 4.1. Celle-ci s'exprime comme le nombre moyen de noeuds par unité de surface. Varier ainsi la densité permet de tester la capacité de l'algorithme à résister au passage à l'échelle.

Tableau 4.1 Variation de la densité spatiale des noeuds

| | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Nombre de noeuds | 160 | 200 | 260 | 400 | 800 | 1600 | 2000 | 2660 | 4000 | 8000 |
| Densité spatiale | $\frac{1}{1000}$ | $\frac{1}{800}$ | $\frac{1}{600}$ | $\frac{1}{400}$ | $\frac{1}{200}$ | $\frac{1}{100}$ | $\frac{1}{80}$ | $\frac{1}{60}$ | $\frac{1}{40}$ | $\frac{1}{20}$ |

Les heuristiques proposées pour la sélection des MPR sont toutes conçues sur base des modélisations des MANET faisant partie des modèles dits géométriques tels que l'UDG et le LNS. Comme nous le faisons remarquer dans [80], des heuristiques conçues de cette façon risquent d'avoir des performances fortement dépendantes de la distribution spatiale des noeuds. Il convient donc de tester également la capacité des heuristiques à résister à des

changements de distribution spatiale des nœuds. Pour ce faire, trois distributions spatiales différentes sont utilisées lors de la génération des instances :

- La distribution uniforme : cette distribution est fréquemment utilisée pour générer les positions des nœuds dans l'espace, notamment dans [63] où les auteurs utilisent le même nombre de nœuds et font varier la taille de l'espace pour obtenir des densités différentes. Dans notre cas, nous maintenons un espace statique et faisons varier le nombre de nœuds qui sont distribués uniformément dans cet espace. La figure 4.4 illustre une instance de réseau où 400 nœuds sont distribués uniformément dans l'espace de $400m \times 400m$ considéré.
- La distribution normale : la loi normale est utilisée pour modéliser des phénomènes qui dépendent d'un très grand nombre de paramètres. Il nous a paru utile de tester les algorithmes sur des instances où les positions des nœuds dans l'espace correspondent à une distribution normale. Rice [81] propose un algorithme qui permet de générer des positions des nœuds suivant cette distribution. Cet algorithme a été utilisé pour générer les instances utilisées dans ces évaluations. Comme l'illustre la figure 4.5, les 400 nœuds sont distribués suivant un contour davantage circulaire que rectangulaire.
- La distribution stationnaire : le modèle de mobilité random waypoint [82] est très utilisé dans l'évaluation des solutions proposées pour les MANET. Lorsqu'un MANET dans lequel les nœuds se déplacent suivant ce modèle de mobilité atteint un état stationnaire, la distribution spatiale associée aux positions des nœuds constitue une bonne instance pour tester des algorithmes proposés pour les MANET. Navidi et Camp [83] proposent des algorithmes qui génèrent des positions des nœuds suivant une distribution stationnaire résultant du modèle de mobilité random waypoint. L'un d'eux a servi à générer les instances utilisées pour ces évaluations. Un exemple sur 400 nœuds est illustré en figure 4.6.

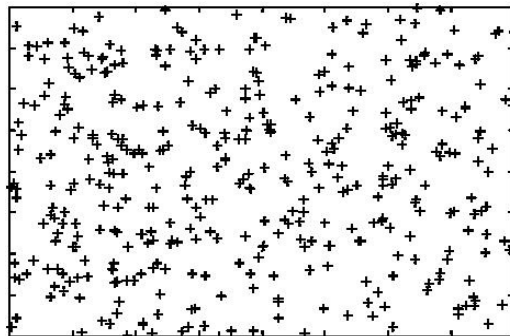


Figure 4.4 400 nœuds suivant une distribution uniforme

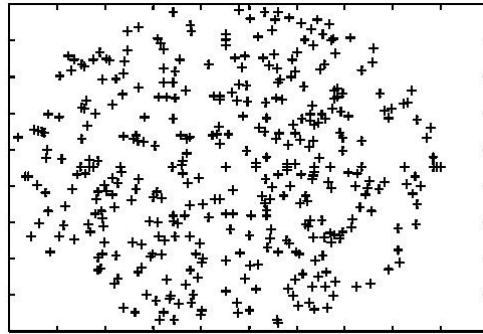


Figure 4.5 400 nœuds suivant une distribution normale

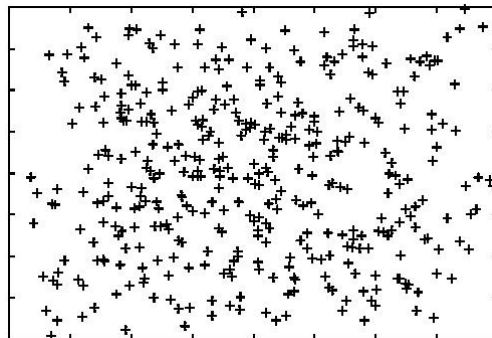


Figure 4.6 400 nœuds suivant une distribution stationnaire

Les valeurs des métriques

Une fois les positions des nœuds générées, il faut pouvoir générer les valeurs des métriques. Le Willingness étant une caractéristique associée aux stations, pour chaque nœud généré, une valeur entre 0 et 7 est générée aléatoirement et attribuée à son Willingness. Les arcs et les valeurs des métriques associées sont ensuite générés de la manière suivante :

- Un arc est généré entre deux nœuds quelconques si la distance qui les sépare est inférieure à 100m. La portée est fixée à $R=75m$. Nous avons opté pour le modèle de transmissions proposé dans [62]. La probabilité de réception correcte de messages $P(x,y)$ sur chaque arc (x,y) est donc calculée en fonction de la distance d_{xy} entre x et y à l'aide de la même formule que dans [63]:

$$P(x,y) = \begin{cases} 1 - \frac{\left(\frac{d_{xy}}{R}\right)^4}{2} & \text{si } d_{xy} < R, \\ \frac{(2R - d_{xy})^4}{2R^4} & \text{sinon} \end{cases} \quad (19)$$

Lorsque la distance entre deux nœuds est égale à la portée $R=75m$, la probabilité de réception correcte sur l'arc associé vaut 0.5.

- La valeur du débit $B(x,y)$ sur chaque arc (x,y) est générée aléatoirement dans l'intervalle $[[500, 1500]]$, suivant une distribution uniforme dont la moyenne est 1000.
- La valeur du délai $D(x,y)$ sur chaque arc (x,y) est générée aléatoirement sur l'intervalle $[[150, 450]]$, suivant une distribution uniforme dont la moyenne est 300.

Les valeurs considérées pour les différentes métriques sont volontairement proches afin d'éviter que *QH* obtienne facilement une meilleure moyenne en sélectionnant uniquement quelques arcs ayant des valeurs très élevées pour certaines métriques. Ces évaluations ne sont pas destinées à mesurer les performances que pourrait avoir notre solution dans un MANET réel. Le but poursuivi à cette étape est essentiellement de tester l'heuristique proposée sur un grand nombre de configurations, et de comparer les résultats obtenus avec ceux des heuristiques précédemment proposées. Le nombre de nœuds, les densités, la portée considérée, les valeurs des métriques générées aléatoirement sur les arcs dans les différentes instances sont assez marginales par rapport à celles rencontrées dans un MANET du monde réel. Cependant, elles suffisent à constituer un ensemble de configurations suffisamment intéressantes pour faire ressortir les points forts ainsi que les points faibles des différentes heuristiques, et permettre ainsi de choisir les mieux adaptées pour la qualité de service avec OLSR. C'est précisément l'objectif poursuivi dans ces évaluations.

4.2.2 Evaluation comparative de QH

Nous avons programmé et testé toutes les heuristiques considérées dans les mêmes conditions en termes de structure de données, de matériels et de logiciels. Pour chaque instance, un nœud i localisé au centre de l'espace considéré procède à la sélection des MPR en recourant à :

- **SG**: le simple greedy proposé dans [30] et qui permet d'obtenir un ensemble de MPR de taille suffisamment proche du minimum pour optimiser la diffusion ;
- **3626**: l'heuristique pour la sélection des MPR dans la spécification d'OLSR [4] ;
- **GE3**: l'heuristique proposée dans [36] et qui sélectionne les MPR de manière à obtenir des routes optimales vers chaque nœud du second voisinage par rapport à une métrique. Nous l'avons appliqué successivement à chacune des métriques considérées.
- **MAXP**: l'heuristique proposée dans [63] pour maximiser la probabilité de réception correcte des messages. L'intérêt de cette heuristique est qu'elle nous permet vérifier si

en prenant simultanément en considération quatre métriques, *QH* peut encore améliorer les résultats sur la probabilité de réception correcte.

- ***QH***: l'heuristique proposée dans cette thèse pour la sélection des MPR. Elle a été exécutée avec les valeurs suivantes pour les paramètres :
 - $T_{max}=5$ secondes, le temps maximum d'exécution de l'heuristique ;
 - $R_{max}=4$, le nombre de métriques considérées ;
 - $\theta=0$, afin de garantir que *QH* obtiendra à peu près le même nombre de MPR que *SG*. La troisième étape de *QH* ne sera exécutée que s'il y a des places gagnées par la procédure de correction de marquage à la seconde étape ;
 - $o=(B,D,P,W)$, l'ordre de préférence sur les métriques considérées dont les signatures δ respectives sont $(1,-1,1,1)$;
 - La résolution du système d'équations (16) pour $n=4$ nous permet de déduire les coefficients $a_1=0.3$, $a_2=0.27$, $a_3=0.23$, $a_4=0.2$ nécessaires à la définition de la fonction score $l \cdot l_0$. Ils sont arrondis à la deuxième décimale.

Les résultats des évaluations sont présentés séparément pour chaque distribution spatiale utilisée. Lorsque les résultats obtenus sur les différentes distributions sont très similaires, un seul d'entre eux est présenté. Chaque valeur présentée sur les graphiques des résultats est obtenue en faisant la moyenne sur 100 instances pour chaque densité et pour chaque distribution. Pour obtenir tous les résultats, les heuristiques sont ainsi exécutées sur 3000 instances : 3 distributions x 10 densités x 100 instances.

Comparaison des temps d'exécution

Le temps d'exécution est un critère crucial pour la comparaison des heuristiques. Au vu des différences très importantes entre les heuristiques, la présentation des résultats est décomposée en deux parties. Pour les instances comportant moins de 1000 noeuds, on observe que toutes les heuristiques s'exécutent en moins d'une seconde quelle que soit la distribution spatiale considérée. Les instances des distributions normales et stationnaires entraînent cependant un temps d'exécution jusqu'à 3 fois plus long que celles de distribution uniforme pour les heuristiques *MAXP*, *GE3* et *QH* (Figure 4.7). Ce dernier constat est également fait sur les mêmes heuristiques pour les instances de plus de 1000 noeuds. *MAXP* connaît un pic à 1000s pour la distribution stationnaire et 2500s pour la normale (Figure 4.8). Le temps d'exécution de *GE3* pour les mêmes instances varie entre 100s et 250s. C'est le

même ordre de temps d'exécution observé pour *MAXP* sur les instances de distribution uniforme. Il peut être rappelé que les auteurs de cet algorithme [63] l'avaient évalué sur un graphe où les 500 nœuds considérés étaient distribués uniformément dans l'espace. Ceci pourrait expliquer le fait qu'ils n'aient pas observé les problèmes de passage à l'échelle de *MAXP* à la fois par rapport au nombre de nœuds et à leur distribution spatiale. Cette observation conforte notre point de vue sur la manière dont l'évaluation des algorithmes pour les MANET doit être opérée.

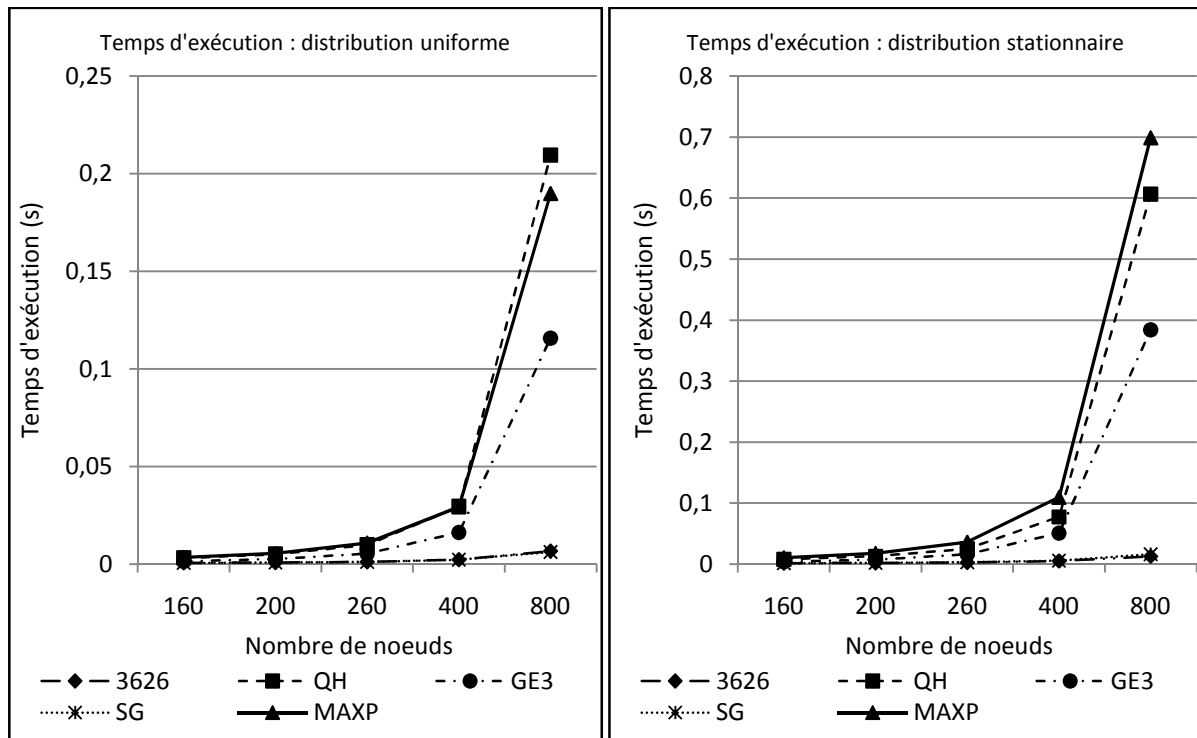


Figure 4.7 Temps d'exécution pour moins de 1000 nœuds

La figure 4.9 montre bien que le simple greedy (*SG*) et l'heuristique du RFC 3626 s'exécutent en moins de 2s même pour 8000 nœuds. Le fait que 3626 sélectionne systématiquement tous les nœuds ayant un Willingness de 7 au début lui permet sûrement d'éliminer un grand nombre de voisins à deux sauts et franchir très rapidement les étapes suivantes. L'heuristique *QH* proposée dans cette thèse respecte la contrainte imposée des 5s qu'elle ne franchit que pour la densité la plus forte à 8000 nœuds. Le temps d'exécution met donc en évidence la rapidité exceptionnelle des heuristiques *SG* et *3626* qui sont utilisées dans le mode best-effort d'OLSR. Il permet d'établir que *QH* viole la contrainte de 5s au-delà de 4000 nœuds. Il met en évidence l'incapacité de *GE3* et *MAXP* à supporter le passage à l'échelle, ce qui suscite une première interrogation sur le fait que ces deux heuristiques soient adaptées aux MANET.

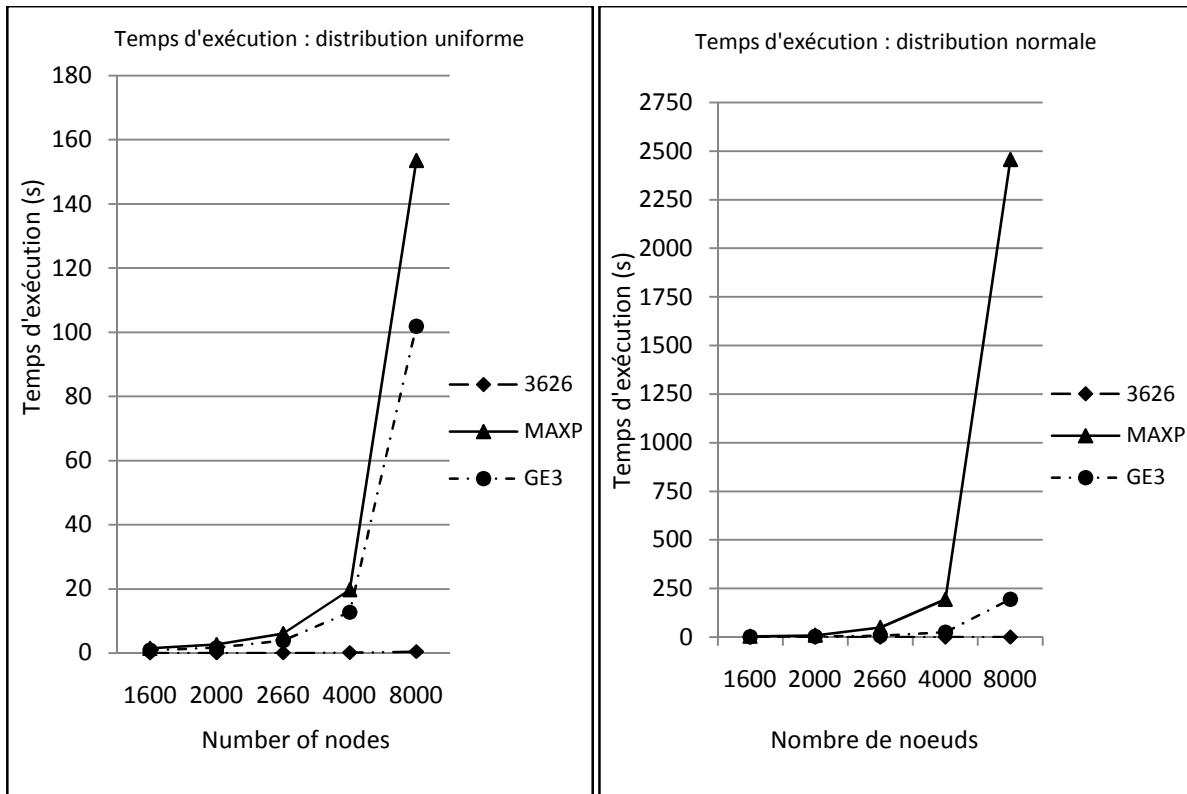


Figure 4.8 Temps d'exécution des algorithmes lents

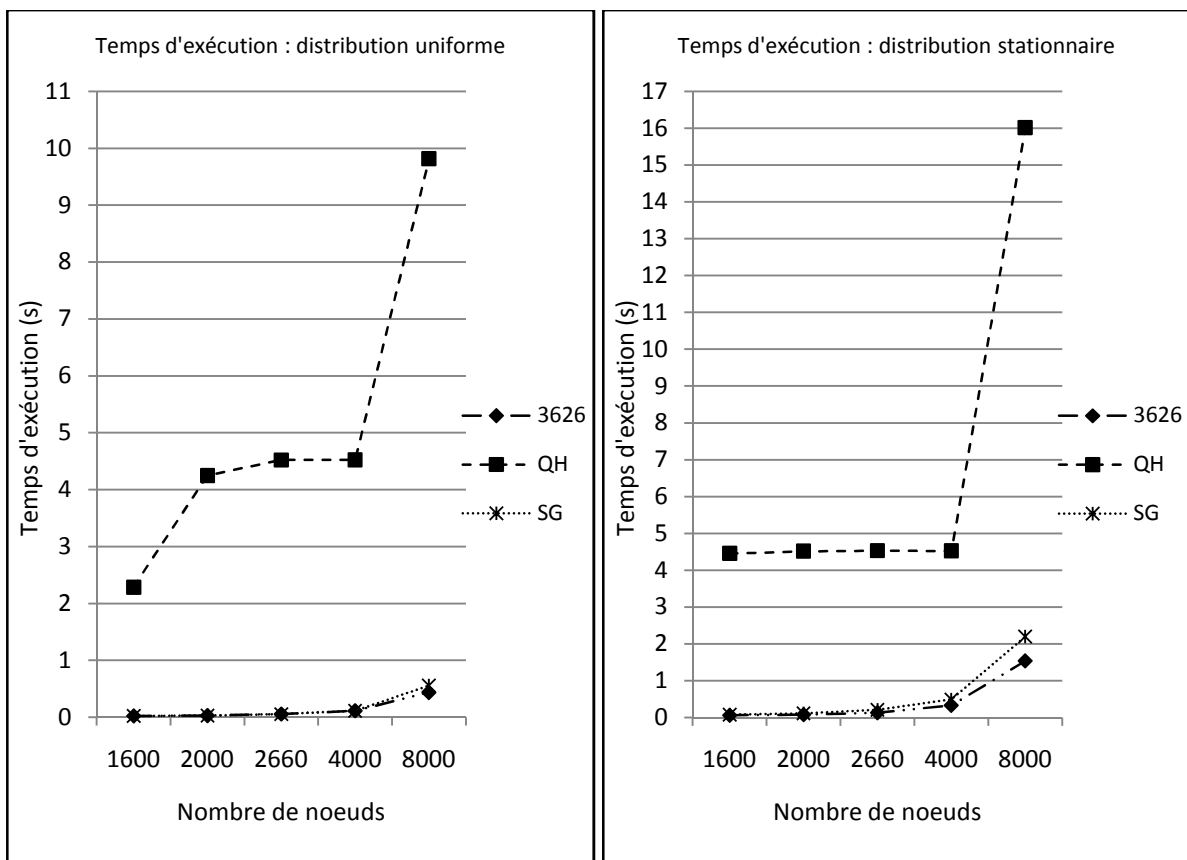


Figure 4.9 Temps d'exécution des algorithmes rapides

Comparaison sur le nombre de MPR sélectionnés

Dès les instances de plus de 400 nœuds, le nombre de MPR sélectionnés par *MAXP*, *GE3* et *3626* (figure 4.10) dépasse le double de celui obtenu par *SG* et *QH* qui sont à égalité parfaite pour toutes les instances (figure 4.11).

Il faut bien se rendre compte que si le nœud i qui procède à la sélection de MPR émet ou retransmet un message de diffusion dans un MANET où il a 4000 voisins à 2 sauts au plus, ce message sera retransmis par ses voisins à 1 saut :

- 25 fois s'il recourt à *SG* ou *QH* quelle que soit la distribution spatiale ;
- 125 fois s'il recourt à *3626* ou 250 avec *MAXP* ou 350 avec *GE3* dans les instances de distribution uniforme. On observe respectivement le double de ces valeurs avec les autres distributions. Cela peut avoir un impact considérable sur la consommation de la bande passante et par conséquent, sur la capacité du MANET à satisfaire les contraintes relatives au débit.

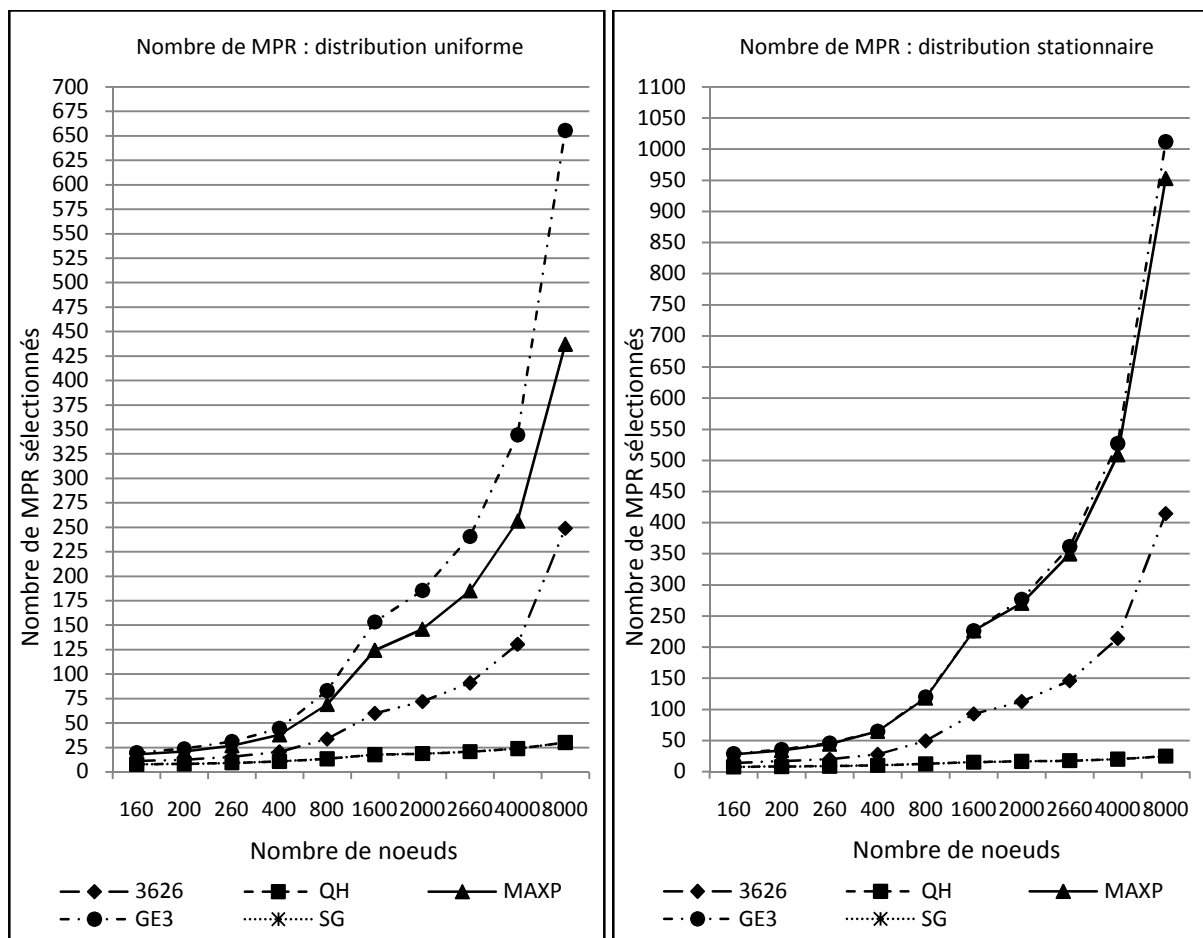


Figure 4.10 Nombre de MPR sélectionnés

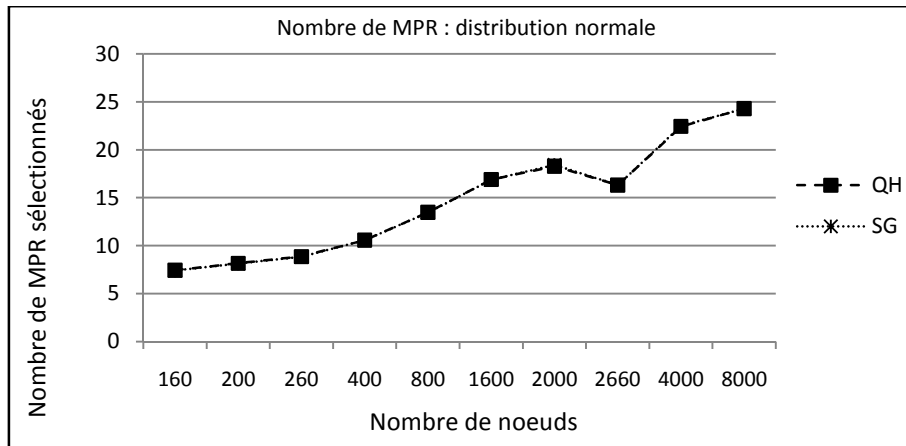


Figure 4.11 Nombre de MPR sélectionnés par *SG* et *QH*

Ce nombre très élevé de MPR obtenus par *MAXP*, *GE3* et *3626* peut avoir en pratique des conséquences préjudiciables sur l'optimisation de la diffusion. Le fait que *3626* soit l'heuristique du RFC n'est pas une caution. En effet, en pratique il n'y a jamais de nœuds ayant un Willingness de 7. Cette valeur est censée être affectée uniquement par un opérateur aux nœuds qu'il introduit dans le MANET afin de pallier des défauts de connectivité. Il est donc envisageable que ce type de déploiement ait été étudié au préalable pour éviter de dégrader le fonctionnement d'OLSR. En résumé, dans les implémentations d'OLSR, l'heuristique qui est exécutée s'apparente plus à *SG* qu'à *3626*. Ces observations ajoutées au temps d'exécution suffisent à nous convaincre que *MAXP* et *GE3* ne sont pas adaptées à des MANET denses. Ces derniers sont pourtant ceux pour lesquels OLSR a été conçu.

Le débit moyen des liaisons

L'heuristique *GE3* est néanmoins intéressante à des fins d'évaluation parce qu'elle fournit les routes optimales et peut donc nous permettre d'observer la marge d'amélioration dont nous disposons encore sur *QH*. Appliquée au débit, on peut voir sur la figure 4.12 qu'elle obtient des résultats jusqu'à 20% meilleurs que ceux de *QH*, ce dernier étant lui-même jusqu'à 27% meilleur que l'heuristique du RFC 3626. On observe que le taux d'amélioration augmente avec la densité du réseau. En effet, il existe davantage de routes alternatives, permettant ainsi à l'heuristique qui les recherche de trouver de meilleures routes. Les allures de *GE3* et *QH* illustrent bien cette hypothèse face à celle de *3626* qui reste plate. Il faut cependant garder à l'esprit que *GE3* obtient cette meilleure moyenne au prix d'un nombre de MPR largement plus élevé. Malgré le fait qu'il prenne en compte 4 métriques simultanément, *QH* est capable d'améliorer de 27% le débit par rapport à un algorithme best-effort.

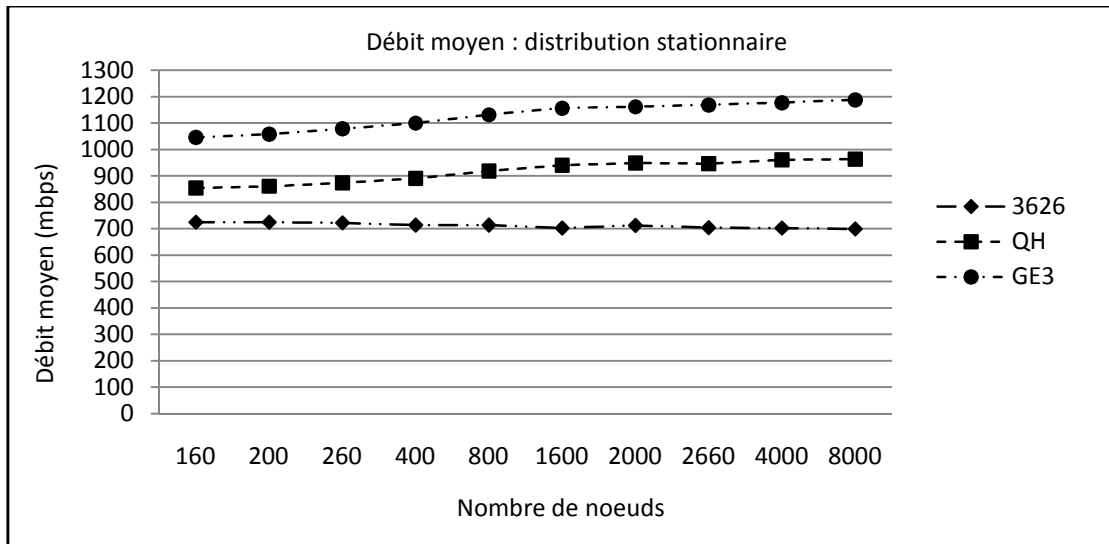


Figure 4.12 Débit moyen obtenu par les MPR sélectionnés

Le délai moyen sur les liaisons

On peut faire sur le délai des remarques analogues à celles faites sur le débit. Les taux d'améliorations sont néanmoins plus faibles. *GE3* est meilleur que *QH* d'environ 15% seulement, et ce dernier est meilleur que *3626* d'environ 10%. On observe que cette amélioration croît également avec la densité du graphe (figure 4.13). Il faut néanmoins garder à l'esprit que *GE3* ne prend en compte qu'une seule métrique à la fois, alors que *QH* réalise ces résultats en considérant les 4 métriques simultanément.

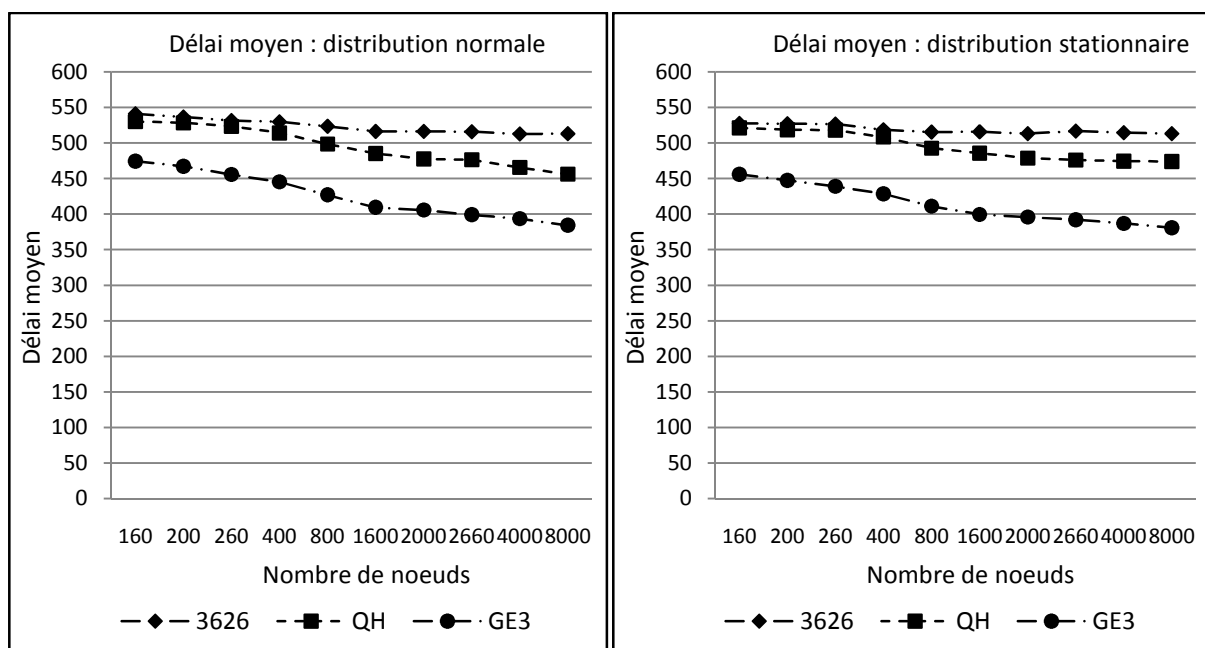


Figure 4.13 Délai moyen obtenu par les MPR sélectionnés

La probabilité de réception correcte

Plusieurs observations peuvent être faites par rapport à cette métrique. La première concerne les valeurs qui sont globalement faibles pour toutes les heuristiques. Nous avons souligné le fait qu'elles ne correspondent pas rigoureusement à ce qui pourrait être observé dans un MANET réel. Elles permettent de départager les heuristiques et cela suffit à ces évaluations. Mais expliquons tout de même le phénomène : si nous considérons une route $x \rightarrow y \rightarrow z$ où d_{xy} et d_{yz} sont exactement égaux à R , alors $P(x,y)=P(y,z)=0.5$. La conséquence est que la route $x \rightarrow y \rightarrow z$ a alors une probabilité de réception correcte de 0.25, ce qui peu paraître très faible. Dans [63] les auteurs considèrent les liaisons en fonction de la portée, ils ne peuvent donc obtenir que des arcs ayant au moins une probabilité de 0.5 chacun. Nous avons opté pour générer également des arcs entre des nœuds étant suffisamment éloignés pour que la probabilité de réception correcte atteigne parfois 10%. Ceci nous permet d'être sur le même plan que les travaux utilisant les valeurs réelles observées sur les taux de perte sur les liaisons. Les moyennes assez faibles observées dans ces évaluations tiennent leur explication de là.

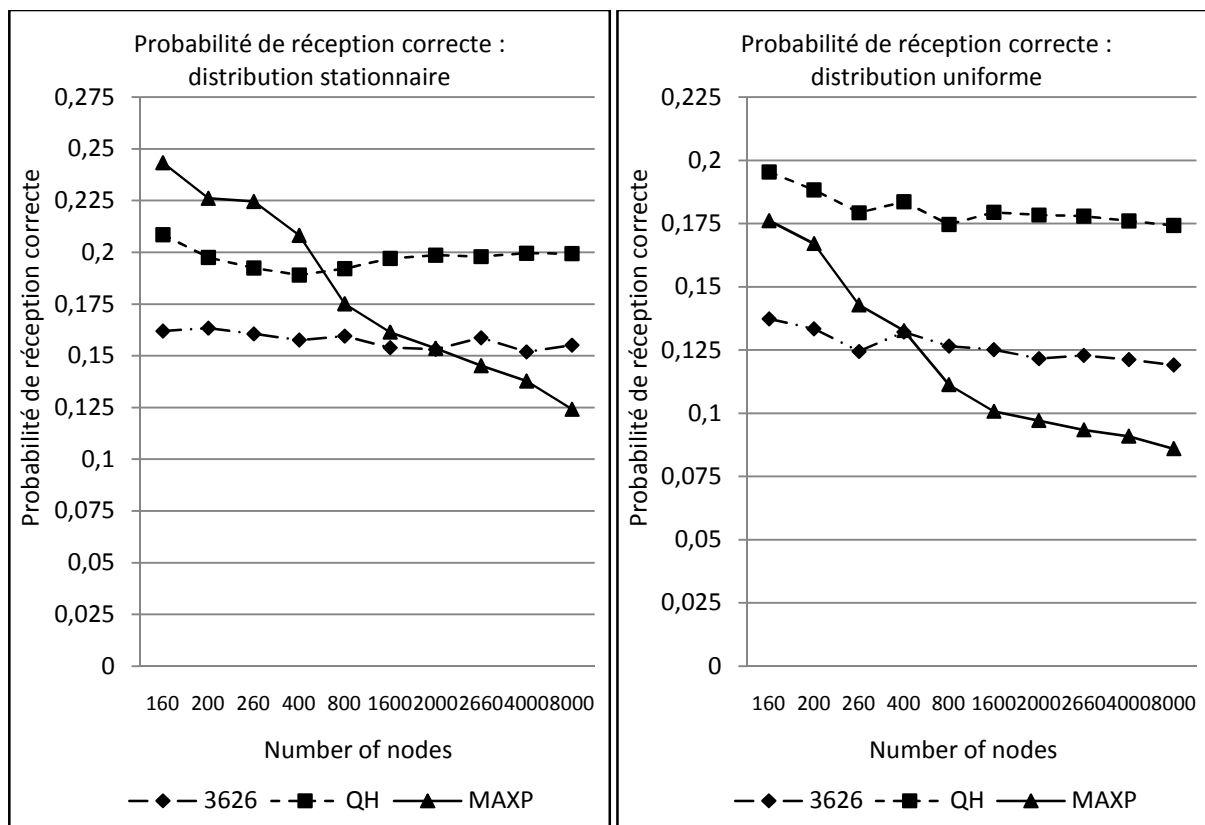


Figure 4.14 Probabilité de réception correcte des messages

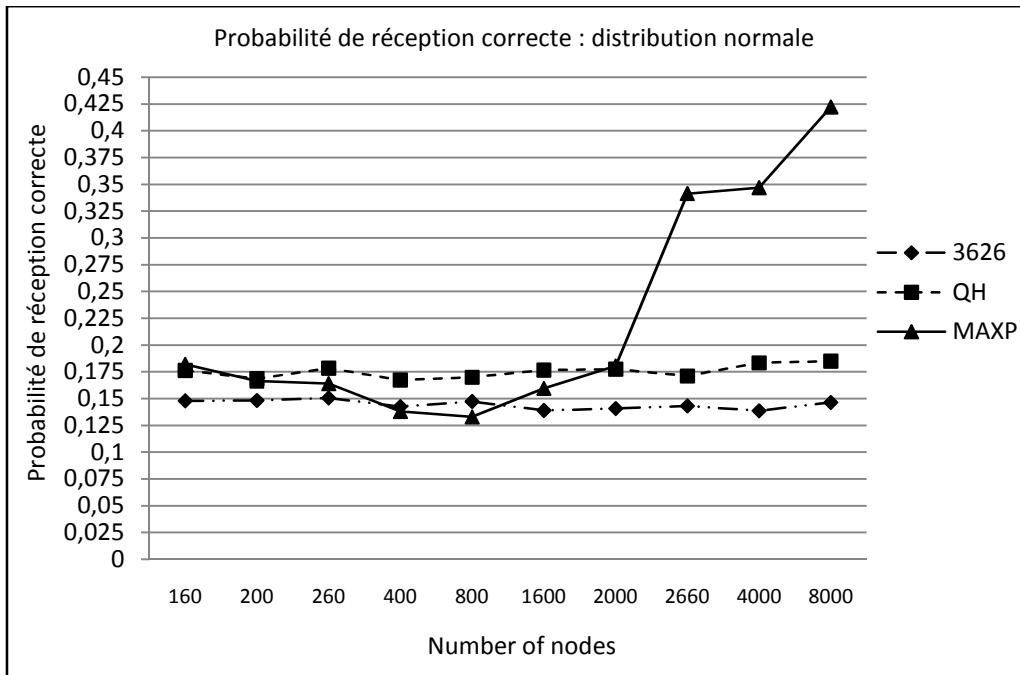


Figure 4.15 Probabilité de réception correcte pour distribution normale

La seconde observation porte sur le comportement des heuristiques vis-à-vis de la distribution spatiale. Nous constatons que *QH* et *3626* sont plutôt stables dans leurs allures quelle que soit la distribution spatiale considérée. Dans les distributions uniforme et stationnaire, *MAXP* a tendance à se dégrader avec la densité au point d'obtenir de résultats moins bons que *3626*. *QH* reste meilleure que cette dernière qu'il améliore de 15% à 50% (figure 4.14). Sur les instances de distribution normale, *MAXP* commence par décroître avant de s'améliorer considérablement et d'atteindre le double des valeurs obtenues par *QH* (figure 4.15). Ceci met encore en évidence l'intérêt de nos choix pour les évaluations. Une telle particularité n'aurait pas pu être mise en évidence autrement. Il faut cependant noter que pour ces résultats *MAXP* cumule plus de 600 MPR là où *QH* n'en atteint que 25 au maximum. La disposition des nœuds dans une distribution normale suit un contour circulaire. Dans cette configuration et en cas de forte densité, chaque nœud peut potentiellement sélectionner un très grand nombre de MPR redondants et par conséquent réaliser une probabilité de réception élevée. La figure 4.15 montre d'ailleurs que *MAXP* n'obtient de meilleurs résultats qu'à partir de 2000 nœuds.

Le Willingness moyen

Si l'on considère que le Willingness traduit l'autonomie énergétique des nœuds, alors *QH* permet effectivement de sélectionner en tant que MPR des nœuds ayant une autonomie élevée. Le taux d'amélioration par rapport à *SG* va de 25% à 70% (figure 4.16).

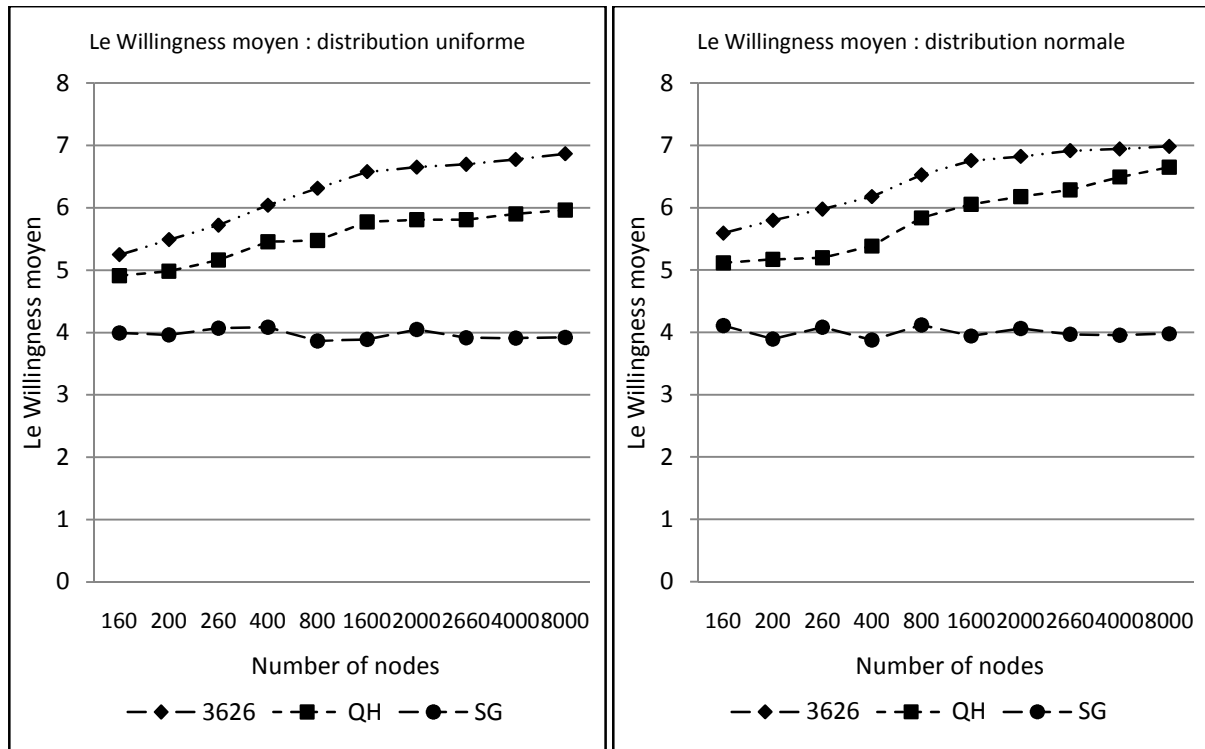


Figure 4.16 Willingness moyen avec les MPR sélectionnés

En résumé, les évaluations menées établissent que les heuristiques utilisées dans le mode best-effort d'OLSR *SG* et *3626* sont très rapides et elles résistent bien au passage à l'échelle, aussi bien par rapport à la taille et à la densité du réseau que par rapport à la distribution spatiale des nœuds. Ceci explique peut être en partie le fait que dans les implémentations actuellement utilisées, elles soient préférées aux heuristiques proposées pour la qualité de service.

Néanmoins, leurs mauvais résultats sur les valeurs des métriques montrent bien qu'elles ne permettent pas aux nœuds du réseau de disposer de meilleures routes pour le trafic présentant des contraintes de qualité de service. L'heuristique *GE3* qui permet a contrario d'obtenir les routes optimales par rapport à une seule métrique de QoS à la fois atteint des temps d'exécution trop longs lorsque la taille des instances est très grande. Par rapport au temps, il reste applicable à des réseaux où chaque nœud peut avoir jusqu'à un millier de nœuds dans ses premier et second voisinage, mais il sélectionne un nombre de MPR trop élevé. Cela pourrait entraîner une surconsommation de ressources à l'instar de la bande passante comme mentionné précédemment, ce qui est contraire au but poursuivi. Les mêmes remarques peuvent être formulées à propos de *MAXP*, à l'exception que cette dernière n'obtient pas les routes optimales, qu'elle est généralement moins performante que les autres heuristiques et très instable s'agissant de la distribution spatiale des nœuds.

Comparativement aux heuristiques best-effort, *QH* permet d'améliorer la qualité obtenue sur les quatre métriques simultanément tout en maintenant un temps d'exécution et un nombre de MPR raisonnables. Ses résultats sont stables quelle que soit la distribution spatiale considérée. De plus, elle fournit de meilleurs résultats avec la densité croissante des instances.

La complexité en temps des heuristiques

Nous terminons cette première série d'évaluations par une présentation succincte de la complexité en temps des différentes heuristiques présentées pour la sélection des MPR. La plupart d'entre elles sont directement dérivées du *simple greedy SG*, il est donc normal qu'elles aient pratiquement toutes une complexité en temps similaire à celle de cette dernière.

Nous adoptons les notations suivantes pour en simplifier la présentation :

- α : le degré maximum observé sur tous les nœuds du MANET ;
- β : le nombre total de voisins à deux sauts du nœud qui réalise la sélection de MPR ;
- μ : le nombre de MPR sélectionnés à l'étape 2 des heuristiques (étape 3 pour *3626*) ;
- n : le nombre de métriques considérées dans *QH*.

Le tableau 4.2 ci-dessous présente la complexité en temps des différentes heuristiques en fonctions des paramètres α , β , μ et n tels que définis ci-dessus.

Tableau 4.2 Complexité en temps des heuristiques présentées

| Heuristique | <i>SG</i> | <i>3626</i> | <i>MAXP</i> | <i>GE3</i> | <i>QH</i> |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|--|
| Complexité | $o(2\alpha\mu+\alpha)$ | $o(3\alpha\mu+\alpha)$ | $o(3\alpha\mu+\alpha)$ | $o(2\alpha\beta)$ | $o(\alpha n\theta+2\alpha n\mu+2\alpha n)$ |

La complexité de *QH* augmente en comparaison avec celle du *simple greedy* notamment suite à l'introduction de la procédure *CORRECTION_MARQUAGE* qui itère sur les n métriques considérées. Néanmoins, lorsque θ est fixé à zéro, la dernière étape de *QH* n'a aucun impact. L'heuristique *MAXP* qui a une complexité en temps équivalente à *3626* accuse néanmoins des temps d'exécution beaucoup plus longs. En effet, le degré relatif des nœuds n'étant pas pris en compte dans *MAXP* qui n'essaie donc pas de minimiser le nombre de MPR, le paramètre μ y atteint plus souvent des valeurs beaucoup plus élevées que dans *3626*. Une dernière remarque concerne *GE3*. On observe que la complexité de cette dernière heuristique est un produit direct du nombre de nœuds à deux sauts et de la densité. On comprend dès lors le fait que son temps d'exécution augmente rapidement avec ces deux paramètres.

4.2.3 Evaluation de l'efficacité de QH

Les évaluations de la section précédente permettent de situer QH comparativement aux autres heuristiques proposées pour la sélection des MPR. Néanmoins, ces comparaisons ne sont pas tout à fait équitables parce que :

- les autres heuristiques ne prennent pas en compte le même nombre de métriques simultanément comme le fait QH ;
- elles ne sont pas soumises à la contrainte sur le nombre de MPR. Nous avons suffisamment argumenté l'intérêt de contrôler le nombre de MPR sélectionnés, même lorsqu'il s'agit de MPR dédiés à la qualité de service et qui ne participeront pas à la retransmission des messages de diffusion.

Dans cette section, le but est d'évaluer l'efficacité de QH en tant qu'heuristique de sélection de MPR à la fois pour l'optimisation de la diffusion et pour la qualité de service sur base de plusieurs métriques simultanément. Pour ce faire, nous procédons comme suit :

- D'abord, nous comparons les valeurs obtenues sur les métriques par QH avec celles obtenues par une heuristique qui obtient le même nombre de MPR et qui ne prend en compte aucune métrique lors de la sélection, en l'occurrence SG . Cette comparaison permet de constater l'efficacité relative de QH par rapport aux heuristiques best-effort qui obtiennent des résultats complètement aléatoires sur les métriques ;
- Ensuite, nous comparons ces mêmes valeurs par rapport à un algorithme qui vise à obtenir la meilleure valeur sur une seule métrique à chaque fois, tout en considérant le même nombre de MPR que QH . Certes, une comparaison équitable aurait pu être obtenue en comparant avec un algorithme qui traite le même nombre de métriques. A défaut de trouver un tel algorithme, nous réduisons notre objectif à mesurer la distance des résultats obtenus par QH sur chaque métrique à la valeur optimale qui aurait pu être obtenue pour cette métrique avec le même nombre de MPR que QH .

Nous disposons déjà des valeurs obtenues par SG , il faut maintenant rechercher les valeurs permettant de procéder au deuxième type de comparaisons.

Recherche des valeurs optimales sur chaque métrique

Reprenons le modèle mathématique (MQ) proposé en section 3.2.2, et réduisons sa fonction objectif à une seule métrique m_g . Nous obtenons donc le modèle linéaire (MQ1) ci-après :

$$\begin{array}{l}
\text{(MQ1)} \quad \left[\begin{array}{l}
\text{Maximize} \quad \sum_{j \in N^1(i)} \left(\sum_{k \in N^2(i) \cap N^1(j)} \delta_g^* \mathcal{S}(C_g(x_{jg}, y_{jkg}), z_g) * y_{jk} \right) \\
\text{Subject to} \\
y_{jk} \leq x_j \quad \quad \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\
\sum_{j \in N^1(i)} y_{jk} = 1 \quad \quad \quad k \in N^1(j) \cap N^2(i) \\
\sum_{j \in N^1(i)} x_j \leq Q^* + \theta \\
x_j, y_{jk} \in \{0,1\} \quad \quad \quad j \in N^1(i), k \in N^1(j) \cap N^2(i)
\end{array} \right.
\end{array}$$

La résolution de (MQ1) instancié pour chaque métrique à l'aide du solveur *CPLEX* [78] permet d'obtenir des valeurs suffisamment intéressantes pour procéder au second type d'évaluations. Nous associons les valeurs obtenues pour chaque métrique à un algorithme fictif que nous noterons par *MIP*.

Présentation des résultats

Le tableau 4.3 ci-après reprend les résultats bruts obtenus par les heuristiques sur les mêmes instances que lors des précédentes évaluations de la manière suivante :

- *SG* : sélectionne les MPR sans prendre en compte aucune métrique ;
- *QH* : sélectionne les MPR en prenant simultanément en compte les quatre métriques dans les mêmes conditions de temps d'exécution, de nombre de métriques tout en conservant les mêmes valeurs des paramètres que dans les évaluations précédentes ;
- *MIP* : sélectionne le même nombre de MPR que *QH* et *SG*, et tente de maximiser la valeur d'une seule métrique à chaque fois.

La résolution exacte des instances obtenues sur chaque métrique à partir du modèle (MQ1) par *CPLEX* échoue à partir de 400 nœuds, principalement à cause d'un très grand nombre de variables binaires.

Nous reprenons dans le tableau 4.4 les écarts des valeurs obtenues par *QH* par rapport aux valeurs obtenues par *MIP*. Ces dernières valeurs ne sont pas tout à fait les valeurs optimales du fait de la linéarisation, mais elles constituent une estimation satisfaisante pour nos comparaisons. En considérant les valeurs fournies par *QH*, on observe donc une amélioration par rapport à *SG* de l'ordre de 7% à 22% pour les métriques débit *B* et délai *D*; et un écart maximum de 8% aux valeurs de *MIP* pour *B* et 3% de celles pour *D*.

Tableau 4.3 Valeurs obtenues par *SG*, *QH* et *MIP* pour toutes les métriques

| Heuristique/ Densité | Distribution uniforme | | | | Distribution normale | | | | Distribution stationnaire | | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------------------|----------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|----------|------|
| | <i>B</i> | <i>D</i> | <i>P</i> | <i>W</i> | <i>B</i> | <i>D</i> | <i>P</i> | <i>W</i> | <i>B</i> | <i>D</i> | <i>P</i> | <i>W</i> | |
| <i>MIP</i> | 160 | 884 | 532 | 0,15 | 4,99 | 903 | 521 | 0,15 | 5,22 | 918 | 508 | 0,17 | 5,55 |
| | 200 | 899 | 530 | 0,14 | 5,04 | 919 | 521 | 0,14 | 5,29 | 926 | 503 | 0,17 | 5,56 |
| | 260 | 905 | 519 | 0,13 | 5,23 | 915 | 514 | 0,13 | 5,31 | 942 | 503 | 0,15 | 5,63 |
| <i>QH</i> | 160 | 861 | 538 | 0,19 | 4,91 | 883 | 530 | 0,18 | 5,11 | 854 | 521 | 0,20 | 5,33 |
| | 200 | 874 | 536 | 0,19 | 4,98 | 884 | 528 | 0,17 | 5,17 | 861 | 518 | 0,19 | 5,35 |
| | 260 | 880 | 524 | 0,18 | 5,16 | 901 | 523 | 0,18 | 5,19 | 873 | 518 | 0,19 | 5,42 |
| | 400 | 890 | 515 | 0,18 | 5,45 | 919 | 514 | 0,17 | 5,38 | 890 | 508 | 0,18 | 5,62 |
| | 800 | 924 | 507 | 0,17 | 5,48 | 937 | 498 | 0,17 | 5,83 | 918 | 492 | 0,19 | 5,96 |
| | 1600 | 950 | 494 | 0,18 | 5,77 | 942 | 485 | 0,18 | 6,05 | 939 | 485 | 0,19 | 6,10 |
| | 2000 | 951 | 490 | 0,18 | 5,81 | 927 | 477 | 0,18 | 6,18 | 948 | 478 | 0,19 | 6,08 |
| | 2660 | 959 | 491 | 0,18 | 5,81 | 937 | 476 | 0,17 | 6,28 | 946 | 476 | 0,19 | 6,19 |
| | 4000 | 967 | 489 | 0,18 | 5,90 | 924 | 465 | 0,18 | 6,49 | 960 | 474 | 0,19 | 6,22 |
| 8000 | 973 | 485 | 0,17 | 5,96 | 883 | 456 | 0,18 | 6,65 | 963 | 474 | 0,19 | 6,26 | |
| <i>SG</i> | 160 | 794 | 580 | 0,10 | 3,99 | 799 | 574 | 0,09 | 4,11 | 789 | 569 | 0,10 | 4,14 |
| | 200 | 800 | 583 | 0,10 | 3,96 | 814 | 581 | 0,08 | 3,89 | 794 | 575 | 0,09 | 4,02 |
| | 260 | 800 | 573 | 0,08 | 4,07 | 796 | 575 | 0,08 | 4,08 | 801 | 585 | 0,08 | 3,95 |
| | 400 | 789 | 576 | 0,07 | 4,08 | 803 | 581 | 0,06 | 3,88 | 800 | 580 | 0,07 | 3,93 |
| | 800 | 808 | 582 | 0,06 | 3,87 | 796 | 575 | 0,05 | 4,12 | 792 | 572 | 0,06 | 4,14 |
| | 1600 | 803 | 579 | 0,05 | 3,89 | 796 | 579 | 0,05 | 3,94 | 808 | 583 | 0,06 | 3,85 |
| | 2000 | 798 | 575 | 0,05 | 4,05 | 794 | 574 | 0,05 | 4,06 | 798 | 576 | 0,06 | 4,02 |
| | 2660 | 798 | 579 | 0,05 | 3,91 | 798 | 578 | 0,05 | 3,97 | 789 | 570 | 0,05 | 4,13 |
| | 4000 | 800 | 581 | 0,05 | 3,91 | 804 | 582 | 0,05 | 3,95 | 800 | 576 | 0,05 | 3,99 |
| 8000 | 795 | 577 | 0,05 | 3,92 | 799 | 579 | 0,05 | 3,97 | 792 | 574 | 0,05 | 4,13 | |

Tableau 4.4 Ecart à *MIP* et amélioration de *SG* par *QH* exprimés en (%)

| Heuristique /Densité | Distribution uniforme | | | | Distribution normale | | | | Distribution stationnaire | | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------------------|----------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|----------|----|
| | <i>B</i> | <i>D</i> | <i>P</i> | <i>W</i> | <i>B</i> | <i>D</i> | <i>P</i> | <i>W</i> | <i>B</i> | <i>D</i> | <i>P</i> | <i>W</i> | |
| <i>MIP</i> | 160 | -3 | -1 | 21 | -2 | -2 | -2 | 17 | -2 | -7 | -2 | 15 | -4 |
| | 200 | -3 | -1 | 26 | -1 | -4 | -1 | 18 | -2 | -8 | -3 | 11 | -4 |
| | 260 | -3 | -1 | 28 | -1 | -2 | -2 | 28 | -2 | -8 | -3 | 21 | -4 |
| <i>SG</i> | 160 | 8 | 7 | 90 | 23 | 11 | 8 | 100 | 24 | 8 | 8 | 100 | 29 |
| | 200 | 9 | 8 | 90 | 26 | 9 | 9 | 113 | 33 | 8 | 10 | 111 | 33 |
| | 260 | 10 | 9 | 125 | 27 | 13 | 9 | 125 | 27 | 9 | 11 | 138 | 37 |
| | 400 | 13 | 11 | 157 | 34 | 14 | 12 | 183 | 39 | 11 | 12 | 157 | 43 |
| | 800 | 14 | 13 | 183 | 42 | 18 | 13 | 240 | 42 | 16 | 14 | 217 | 44 |
| | 1600 | 18 | 15 | 260 | 48 | 18 | 16 | 260 | 54 | 16 | 17 | 217 | 58 |
| | 2000 | 19 | 15 | 260 | 43 | 17 | 17 | 260 | 52 | 19 | 17 | 217 | 51 |
| | 2660 | 20 | 15 | 260 | 49 | 17 | 18 | 240 | 58 | 20 | 16 | 280 | 50 |
| | 4000 | 21 | 16 | 260 | 51 | 15 | 20 | 260 | 64 | 20 | 18 | 280 | 56 |
| 8000 | 22 | 16 | 240 | 52 | 11 | 21 | 260 | 68 | 22 | 17 | 280 | 52 | |

De plus, *QH* améliore de 90% à 280% la probabilité de réception correcte des messages obtenue par *SG*, et de 27% à 68% les valeurs de cette dernière sur le Willingness. L'écart

maximum aux valeurs de *MIP* constaté sur le Willingness est de 4%. Dans les contraintes du modèle (MQ1), nous avons privé *MIP* de la possibilité de sélectionner de MPR redondants pour pouvoir illustrer l'apport de la redondance dans l'amélioration de la probabilité de réception correcte de messages. La preuve en est apportée par les 28% d'amélioration que *QH* réalise sur les résultats obtenus par *MIP* sur cette métrique.

4.3 Conclusion

Les propositions ainsi que les résultats présentés dans ce chapitre ayant été largement commentés et fait l'objet de synthèses au fur et à mesure, nous concluons succinctement ce chapitre. Une heuristique générique a été proposée pour traiter les problèmes de la sélection des MPR aussi bien pour l'optimisation de la diffusion que la qualité de service. Elle a été évaluée avec succès pour quatre métriques de QoS sur des instances de graphes de densités et de distributions spatiales différentes. Il s'agit maintenant d'intégrer *QH* dans OLSR et d'évaluer les performances obtenues avec le protocole de routage ainsi modifié.

5

Une version du protocole OLSR pour la qualité de service

- 5.1 *Une version d'OLSR pour la qualité de service Q-OLSR*
 - 5.1.1 Fonctionnement d'OLSR natif
 - 5.1.2 Estimation et dissémination des valeurs des métriques
 - 5.1.3 Sélection des relais multipoints (MPR)
 - 5.1.4 Calcul des routes
- 5.2 *Evaluation de Q-OLSR*
 - 5.2.1 L'Outil de l'évaluation : l'OPNET Modeler
 - 5.2.2 Implémentation de Q-OLSR dans OPNET
 - 5.2.3 Scénarios utilisés pour les évaluations
 - 5.2.4 Résultats des évaluations
- 5.3 *Conclusion*

5 Une version du protocole OLSR pour la qualité de service

Ce chapitre présente la mise en œuvre des mécanismes que nous proposons pour la qualité de service dans OLSR. Après un bref aperçu sur le fonctionnement du protocole OLSR natif tel qu'il est spécifié dans le RFC 3626 [4], nous présentons d'abord notre modèle d'estimation des valeurs de métriques ainsi que les mécanismes mis en œuvre pour leur dissémination à travers le MANET. Nous proposons ensuite notre approche pour le calcul proactif de routes à QoS. En seconde partie de ce chapitre, nous présentons un prototype de la version du protocole OLSR pour la qualité de service que nous avons développé dans l'environnement de simulation OPNET. Enfin, nous présentons les résultats des évaluations des performances obtenues par simulation pour différents scénarios.

5.1 Une version d'OLSR pour la qualité de service *Q-OLSR*

5.1.1 Fonctionnement d'OLSR natif

Nous limitons la présentation du protocole OLSR à ses fonctionnalités essentielles dont la connaissance est nécessaire à la compréhension de nos propositions. Des aspects tels que l'interopérabilité, la gestion des interfaces multiples, les passerelles vers d'autres réseaux et la sécurité ne seront pas abordés.

Prenons l'exemple de la figure 5.1 pour illustrer les aspects du protocole qui nous intéressent. Nous supposons que chaque nœud ne connaît aucun de ses voisins au début de cette description. Un en-tête commun est utilisé pour tous les messages générés par le protocole OLSR. L'en-tête particulier associé à chaque message se trouve dans la partie DATA d'un paquet OLSR. Chaque nœud du réseau commence par générer un message HELLO vide et le transmet ensuite en broadcast. Le format d'un message HELLO est présenté en figure 5.2.

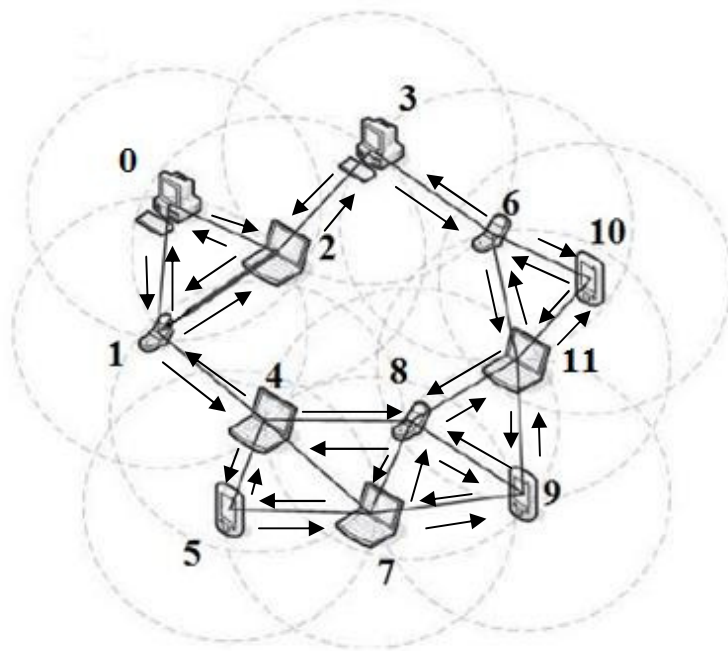


Figure 5.1 Envoi de messages HELLO

Chaque nœud qui reçoit un message HELLO sait donc qu’il peut écouter l’émetteur. Même si le HELLO est émis en broadcast, tout nœud qui le reçoit le traite, mais ne le retransmet pas.

| En-tête de paquet OLSR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|----------|---|---|---|---|---|-------------------|---|---|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Neighbor Interface Address | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Reserved | | | | | | | | | Htime | | | Willingness | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Link Code | | | Reserved | | | | | | Link message size | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Neighbor Interface Address | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Neighbor Interface Address | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figure 5.2 Format d’un message HELLO dans OLSR natif

Plaçons-nous du point de vue du nœud 8 pour voir comment il traite les messages HELLO vides reçus de ses voisins. Pour simplifier, nous faisons abstraction des détails notamment sur

5.1 Une version d'OLSR pour la qualité de service Q-OLSR

les statuts des liens. Comme tout nœud du réseau, le nœud 8 maintient une table contenant la liste de ses voisins à un et à deux sauts (tableau 5.1). A la réception du message, il ajoute tous les nœuds qu'il peut écouter directement dans sa table de voisins à un saut. Il considère que les liens avec eux sont asymétriques puisqu'à cet instant rien ne lui indique que ces voisins ont à leur tour reçu son message HELLO.

Tableau 5.1 Table de voisins du nœud 8 à réception des HELLO vides

| Voisinage à 1 saut | | | Voisinage à 2 sauts |
|-----------------------|-------------|------|--|
| Coordonnées du voisin | Willingness | Type | Liste de voisins à 2 sauts atteints via le voisin à 1 saut |
| 4 | W(4) | ASYM | - |
| 7 | W(7) | ASYM | - |
| 9 | W(9) | ASYM | - |
| 11 | W(11) | ASYM | - |

Environ 2 secondes après l'émission du premier, le nœud 8 émet un second message HELLO. Il y inclut ses voisins ainsi que le statut de la liaison qui le relie à chacun d'eux (champ Link Code). Le nœud 8 devrait donc retrouver son adresse associée au statut ASYM dans les seconds messages HELLO en provenance de ses voisins actuels. Ces messages contiennent également la liste des autres voisins du nœud émetteur. Parmi ces derniers, le traitement de ces messages permet au nœud 8 de distinguer deux types de voisins : ceux qui sont également ses propres voisins à 1 saut et ceux qui sont strictement des voisins à 2 sauts joignables via l'émetteur du message HELLO. Les voisins à 1 saut deviennent symétriques (SYM), et la liste des voisins à 2 sauts qu'ils permettent d'atteindre est mise à jour comme cela est illustré par le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Table des voisins du nœud 8 à réception des HELLO non vides

| Voisinage à 1 saut | | | Voisinage à 2 sauts |
|-----------------------|-------------|------|--|
| Coordonnées du voisin | Willingness | Type | Liste de voisins à 2 sauts atteints via le voisin à 1 saut |
| 4 | W(4) | SYM | 1, 5 |
| 7 | W(7) | SYM | 5 |
| 9 | W(9) | SYM | - |
| 11 | W(11) | SYM | 6, 10 |

Le nœud 8 procède à la sélection des ses MPR et choisit donc les nœuds 4 et 11 qui lui permettent d’atteindre tous ses voisins à deux sauts. Lorsque le nœud 8 émettra un message de broadcast, à l’exception des HELLO, seuls les nœuds 4 et 11 seront autorisés à le retransmettre. Dans son HELLO suivant, le nœud 8 annoncera 4 et 11 non pas comme des voisins symétriques, mais comme étant ses MPR (Tableau 5.3). A cette étape, le calcul des routes est trivial, les destinations les plus éloignés étant à 2 sauts.

Tableau 5.3 Table des voisins du nœud 8 avec déclaration des MPR

| Voisinage à 1 saut | | | Voisinage à 2 sauts |
|-----------------------|-------------|------|--|
| Coordonnées du voisin | Willingness | Type | Liste de voisins à 2 sauts atteints via le voisin à 1 saut |
| 4 | W(4) | MPR | 1, 5 |
| 7 | W(7) | SYM | 5 |
| 9 | W(9) | SYM | - |
| 11 | W(11) | MPR | 6, 10 |

Considérons un instant le nœud 1. Il est sélectionné comme MPR à la fois par les nœuds 0 et 2 pour atteindre le nœud 4 et par ce dernier pour atteindre les nœuds 0 et 2. En tant que MPR, le nœud 1 vérifie périodiquement la qualité des liaisons qui le relie aux nœuds qui l’ont sélectionné ; ses MPR selectors. Il diffuse cette information à travers l’ensemble du MANET. Le message utilisé à cette fin est le message TC (Topology Control) qui peut être retransmis, à chaque fois par les MPR de l’émetteur précédent. La figure 5.3 en illustre le format.

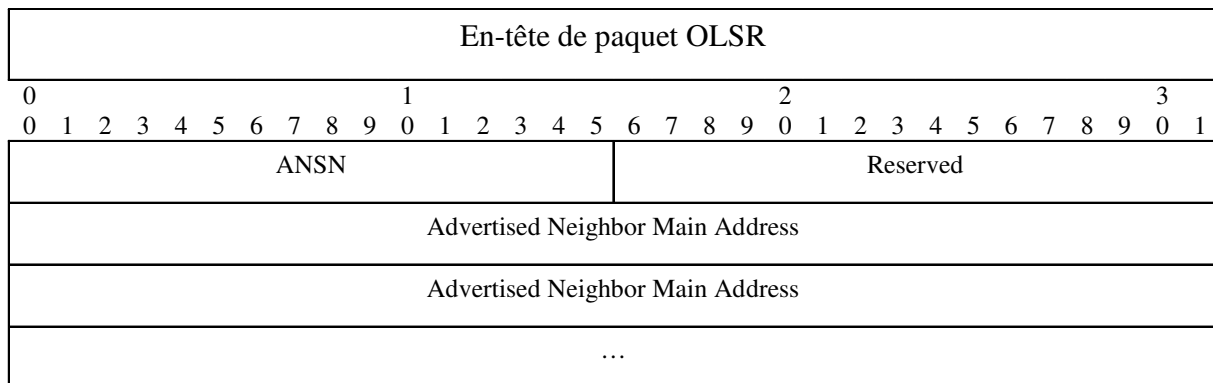


Figure 5.3 Format d’un message TC dans OLSR natif

Le message TC contient un champ ANSN qui contient un numéro de séquence incrémenté chaque fois que le nœud génère un TC. Ceci permet aux récepteurs de repérer l’information la plus récente étant donné qu’un TC émis en premier peut parvenir à certaines destinations

après les TC les plus récents s'il passe par une route ayant un délai plus long. Dans OLSR, les TC sont émis en moyenne toutes les 5 secondes. Revenons donc au nœud 1 et voyons le message TC qu'il a généré. Ce TC contient les adresses des nœuds ci-après : 0, 2 et 4. Il est retransmis par les nœuds 2 et 4 qui sont les MPR sélectionnés par le nœud 1. Après retransmission par 4, le message parvient au nœud 8. Ce dernier se sert de cette information pour compléter sa connaissance de la topologie du réseau. Il sait désormais que par le nœud 1 de son second voisinage, il peut atteindre les nœuds 0 et 2 situés à 3 sauts. Au fur et à mesure qu'il recevra des TC provenant des MPR plus éloignés, il complètera sa vue partielle de la topologie du réseau représentée sous forme de graphe. L'algorithme de Dijkstra [84] est utilisé pour calculer les plus courts chemins vers toutes les destinations connues dans cette vue partielle. Les HELLO et TC successifs reçus lui permettront de mettre à jour l'ensemble de ces informations ainsi que les routes. Ainsi, lorsque le nœud 8 veut émettre vers une destination connue dans sa vue partielle, il dispose immédiatement d'une route à jour.

5.1.2 Estimation et dissémination des valeurs des métriques

Au chapitre 3, nous avons proposé de représenter le MANET par un graphe $G(V, E, M)$ où M est l'ensemble de toutes les métriques considérées dans la solution proposée. Dans les graphes qui ont servi pour l'évaluation (section 4.2) de l'heuristique de sélection de MPR que nous avons proposée au chapitre 4, l'ensemble des métriques M est constitué par :

- le débit B ,
- le délai D ,
- la probabilité de réception P et
- le Willingness W qui est une métrique par défaut dans OLSR.

Paramètres essentiels pour le calcul de routes à qualité de service, les valeurs de ces métriques ne sont par essence pas disponibles au niveau de la couche réseau. Le protocole de routage ne peut les obtenir que si un service spécifique d'échange avec la couche MAC est mis en œuvre comme c'est le cas dans le cadre des approches dites cross-layer [8][9]. Comme cela a été mentionné à la section 1.1, notre proposition se limite aux mécanismes pour la qualité de service qui sont mis en œuvre au niveau de la couche réseau. Par conséquent, nous proposons ici des méthodes de substitution pour estimer les valeurs des métriques dans le protocole de routage lorsqu'elles ne sont pas fournies par la couche MAC.

Estimation des valeurs des métriques grâce aux HELLO

L'idée de base consiste à mettre en œuvre des mécanismes qui s'appuient sur le trafic généré entre les nœuds voisins pour extraire des données permettant une estimation pertinente des valeurs des métriques qui seront utilisés par le protocole comme paramètres de QoS. Le protocole OLSR, notamment par son fonctionnement, offre des outils qui permettent d'envisager ce type d'estimation. En effet, un message HELLO est émis en moyenne toutes les 2 secondes. Comme cette valeur peut être modifiée, remplaçons-la par un paramètre h . Donc si chaque nœud émet un HELLO toutes les h secondes, ceci implique deux choses :

- durant une période d'observation T , un nœud peut rafraîchir à peu près T/h fois l'information sur la qualité des liaisons avec ses voisins à 1 saut ;
- durant la période d'observation T , un nœud est supposé avoir reçu T/h messages HELLO de chacun de ses voisins.

| En-tête de paquet OLSR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|---|---|---|----------|---|---|---|---|-------|---|---|---|---|-------------------|---|---|---|---|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HELLO_GENERATION_TIME | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (Latitude, Longitude, Altitude)_1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (Latitude, Longitude, Altitude)_2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Neighbor Interface Address | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Neighbor Interface QoS metrics values | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figure 5.4 Format d'un message HELLO pour la QoS

Voyons maintenant comment ces informations peuvent servir à l'estimation des valeurs des métriques. Dans un premier temps, nous modifions le format des messages HELLO (figure 5.4) en ajoutant des champs dans la zone DATA. Parmi ces informations figurent :

- l'heure à laquelle le HELLO a été généré : ainsi, en recevant un message HELLO, chaque nœud peut calculer le délai mis par le message pour aller de la source à la destination. Cette méthode n'est peut être appliquée que si tous les nœuds du MANET sont synchronisés sur la même horloge. Cette donnée est représentée sur 32 bits.

- les positions en latitude, longitude et altitude de chaque nœud : ces informations permettent ensuite d'estimer la distance entre la source et la destination afin de pouvoir appliquer une méthode telle que celle proposée dans le modèle LNS [62] pour estimer la probabilité de réception correcte. La représentation de ces données nécessite 64 bits.
- les valeurs des métriques associées à la meilleure liaison avec chaque voisin déclaré dans le HELLO : de cette façon, le nœud récepteur connaît les valeurs des métriques entre les candidats MPR et les voisins à 2 sauts que ces MPR lui permettent d'atteindre. L'ensemble des valeurs des métriques est représenté sur 32 bits. Ainsi, la représentation de chaque voisin incluant l'adresse IP de son interface et les informations de QoS relatives à la liaison via cette interface occupent 64 bits au total.

Un bilan rapide montre que dans Q-OLSR, un message HELLO nécessitera 96 bits supplémentaires comparativement à OLSR natif. Ce nombre est majoré de $32xI$ bits, où I représente le nombre total de voisins déclarés dans un message HELLO d'OLSR natif. On pourrait être tenté de penser que si le service d'estimation des métriques de la couche MAC était disponible, on épargnerait beaucoup sur cette surcharge. En réalité, ce n'est pas le cas. Le service fournirait une information sur l'interface locale, mais cette information ne traduirait pas le rapport particulier que l'émetteur aurait effectivement avec chacun de ses voisins.

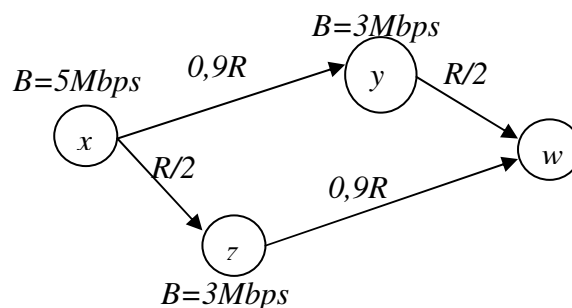


Figure 5.5 Exemple pour illustrer le problème des valeurs locales

En effet, supposons qu'un nœud x obtienne d'un tel service l'information selon laquelle il dispose d'un débit de 5 Mbps (figure 5.5). Considérons deux nœuds z et y disposant chacun d'un débit de 3 Mbps et situés respectivement à des distances égales à $R/2$ et $0.9R$ de x , R étant la portée. Les transmissions de x vers z ne bénéficieront pas du même débit effectif que celles de x vers y , car ce dernier connaît une plus forte atténuation du fait de son éloignement par rapport à x . Si chaque nœud obtient de la couche MAC l'information sur le débit

disponible localement et qu'il en notifie ses voisins, cela suffira-t-il au nœud x pour choisir le meilleur voisin qui va relayer son message vers w ? De notre point de vue, il lui faut une estimation du débit effectif respectivement sur les routes $((x, y), (y, w))$ et $((x, z), (z, w))$ afin de décider. Les mécanismes de substitution proposés dans cette thèse permettent d'obtenir cette différenciation entre les voisins lors de l'estimation des métriques.

Dans l'exemple de la figure 5.1, lorsque le nœud 8 reçoit un message HELLO non vide du nœud 4, il procède à l'estimation des métriques de la façon suivante :

- Estimation du délai entre les nœuds 8 et 4 : soit R_t l'heure à laquelle le nœud 8 reçoit le HELLO qui a été généré à l'heure S_t contenu dans le message. Soit L_h la taille du message HELLO et L_{pdu} la taille d'un PDU¹² du protocole de routage. Une estimation du délai $D(4,8)$ est obtenue par la formule 20. Le rapport L_{pdu}/L_h permet une mise à l'échelle.

$$(R_t - S_t) \times \frac{L_{pdu}}{L_h} \quad (20)$$

- Estimation du débit : considérons la période d'observation T évoquée plus haut. Lorsqu'elle est en cours, à chaque $i^{\text{ème}}$ fois que l'on reçoit un message HELLO du nœud 4, avec $i < T/h$, on cumule deux informations : le délai D_i associé au HELLO en cours et sa taille L_i en bits. Une estimation du débit est obtenue en appliquant la formule :

$$\frac{\sum_{k=1}^{k=i} L_k}{\sum_{k=1}^{k=i} D_k} \quad (21)$$

Lorsqu'une nouvelle période T commence, ces valeurs sont réinitialisées.

La valeur du débit estimée par cette méthode permet uniquement d'évaluer quantitativement la manière dont on reçoit le trafic en provenance des voisins directs. Elle ne correspond pas réellement au débit qu'on observerait sur des communications en unicast, et ne peut donc servir de référence lors de l'application des mécanismes tels que le control d'admission ou la réservation de ressources.

- Estimation de la probabilité de réception correcte : les informations de localisation obtenues dans le HELLO permettent de calculer la distance entre le nœud 4 et le nœud 8. La probabilité de réception correcte est alors estimée en recourant à l'équation 19.

¹² Protocol Data Unit

Ces méthodes d'estimation soulèvent inévitablement la question de l'obtention des positions et le problème de la synchronisation. Un seul équipement permet à lui seul de résoudre les deux problèmes : un récepteur GPS¹³. Il est supposé néanmoins que chaque station du MANET en soit équipée. A ce jour, cet équipement est intégré dans la plupart des terminaux mobiles dont les téléphones mobiles, et de plus en plus des ordinateurs portables, des véhicules et certains capteurs. Nous misons sur sa généralisation. Dans le cas d'une application spécifique des MANET, l'opérateur humain peut synchroniser les horloges au moment de la configuration. S'agissant des positions, elles ne concernent que l'estimation de la probabilité de réception correcte. Une méthode de substitution pourrait consister à estimer cette valeur en se basant sur le nombre de HELLO effectivement reçus d'un voisin sur la période T . En effet, à chaque fin de période T , un nœud doit avoir reçu un nombre équivalent à la partie entière $E(T/h)$ de T/h . Si le nœud 8 reçoit k HELLO du nœud 4, on peut déduire la probabilité de réception correcte $P(4,8)$:

$$\frac{k}{E\left(\frac{T}{h}\right)} \quad (22)$$

Le récepteur GPS ne serait donc pas indispensable. Mais nous y recourons dans *Q-OLSR*.

Dissémination des informations de QoS par les messages TC

Chaque nœud sélectionné en tant que MPR ajoute aux messages TC qu'il génère les informations de QoS sur les liaisons avec ses selectors. Le format des messages TC est modifié comme illustré sur la figure 5.6.

| En-tête de paquet OLSR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----------|---|---|---|---|---|---|---|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TC_GENERATION_TIME | | | | | | | | | | | | | | | | | | Willingness | | | | | | | | | | | | | |
| Advertised Neighbor Main Address | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Advertised Neighbor QoS metrics values | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figure 5.6 Format d'un message TC pour la QoS

¹³ Global Positioning System

Le nœud qui génère le TC y ajoute l'heure locale ainsi que la valeur de son Willingness. Il y ajoute également les informations de QoS associées à chacun de ses selectors. Chaque nœud qui reçoit le message TC le traite pour rafraîchir les informations de QoS comme suit:

- S'il se trouve à un saut du générateur du TC : il applique la même procédure que pour le HELLO afin de mettre à jour le délai et le débit sur la liaison entrante. Il ne modifie pas la métrique probabilité de réception correcte.
- S'il se trouve à plus d'un saut du générateur de TC : il se base sur l'heure à laquelle le TC a été généré pour calculer le délai que le message a mis pour lui parvenir. Il compare ce délai à celui associé à la route lui permettant d'atteindre l'émetteur. Si la différence est importante, il recalcule une route vers l'émetteur. La valeur du Willingness contenue dans le TC lui servira lors du calcul de cette route. Prendre en compte cette valeur permet de privilégier les routes comportant des nœuds intermédiaires ayant un Willingness élevé, et par la suite, plus aptes à assurer la retransmission.

Les informations sur la QoS associées à chaque selector déclaré dans le TC seront ajoutées comme poids au graphe constituant la vue partielle du nœud récepteur. Ce dernier les prendra en compte pour calculer les routes à QoS vers lesdits selectors.

Le problème de la symétrie des liaisons au sens de la QoS

Un autre problème peu évoqué dans la littérature se pose au sujet des valeurs des métriques de QoS sur les liaisons. Pour l'exposer, considérons l'exemple de la figure 5.7.

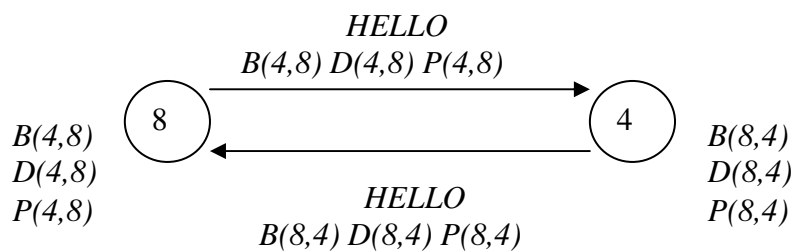


Figure 5.7 Exemple pour illustrer le problème de la symétrie

Lorsque le nœud 8 reçoit un HELLO du nœud 4, il calcule les valeurs des métriques pour la transmission de 4 vers 8. Si le nœud 4 avait déjà reçu un HELLO provenant de 8, ce dernier est dans la liste des voisins du nœud 4 annoncés dans le HELLO que le nœud 8 est en train de traiter. Il se retrouve donc dans la situation où il dispose des valeurs des métriques dans les

deux sens, d'où la nécessité de trouver des réponses aux interrogations suscitées par ces valeurs, à savoir :

- quelles valeurs le nœud 8 doit-il utiliser pour réaliser la sélection des MPR en vue de garantir la qualité de service ?
- quelles valeurs le nœud 8 sélectionné comme MPR par le nœud 4 doit-il diffuser par le biais des messages TC ?

Il existe trois façons logiques de répondre à ces questions, à savoir :

- 1 prendre en compte les valeurs des métriques sur les deux liaisons inverses à chaque fois, ceci nécessiterait :
 - d'ajouter à la sélection multicritère des MPR qui est en soit une tâche difficile, la prise en compte de deux liaisons à chaque fois ;
 - d'envoyer dans les TC 32 bits supplémentaires par selector déclaré pour représenter les valeurs des métriques sur la liaison inverse ;
- 2 prendre en compte les valeurs des métriques sur la liaison sortante uniquement à la fois pour la sélection des MPR et l'envoi des TC :
 - de cette façon, les messages de diffusion bénéficieront d'un acheminement adéquat. En effet, le choix des MPR a été opéré en fonction des liaisons qui vont de l'émetteur vers les MPR, par exemple (8,4), et des MPR, par exemple (4,x), vers les voisins à deux sauts. C'est le cheminement suivi par un message diffusé ;
 - par contre si le nœud 8 sélectionne le nœud 4 comme MPR sur la base de la liaison sortante (8,4), rien n'est garanti sur la qualité de la liaison (4,8). Or, en générant son TC, le nœud 4 déclarera la liaison sortante (4,8) au reste du réseau pour atteindre 8. Il faudra compter sur le fait fortuit que la liaison (4,8) soit aussi bonne que son opposée (8,4) ou sur le fait qu'il existe une route alternative satisfaisant les contraintes de QoS et passant par un autre MPR que 4 pour atteindre 8.
- 3 prendre en compte les liaisons entrantes pour la sélection des MPR et les liaisons sortantes lors de l'envoi des TC :
 - de cette façon le nœud 8 s'assure que le TC diffusé dans le réseau par le nœud 4 annoncera la liaison (4,8) sur base de laquelle le nœud 8 a sélectionné le nœud 4 comme MPR. Ceci permettra aux autres nœuds du réseau d'établir des routes de bonne qualité pour atteindre le nœud 8.

- Néanmoins, lorsque ce dernier émettra ou retransmettra des flux de diffusion, il n'aura aucune garantie sur la qualité des liaisons sortantes, par exemple (8,4), utilisées parce que ses MPR ont été sélectionnés sur base des liaisons entrantes, par exemple (4,8).

Nous avons opté pour l'approche 2 parce que :

- les applications des MANET dans les transports reposent davantage sur des émissions en broadcast qu'en unicast. Nous avons montré que l'approche 2 où la sélection des MPR se fait sur base des liaisons sortantes, est celle qui favorise le broadcast ;
- pour atteindre un nœud situé jusqu'à deux sauts, le nœud source ne se base pas sur la topologie construite grâce aux TC mais il passe par le MPR adéquat. Pour ces destinations qui représentent la majorité des nœuds avec lesquels l'émetteur va échanger, l'approche 2 reste encore la plus favorable ;
- en ce qui concerne les destinations au-delà de deux sauts, voici notre réflexion : ayant opté pour le routage multi-saut, la route calculée localement par un nœud en se basant sur sa vue partielle sert essentiellement à déterminer le prochain saut vers la destination. Nous misons sur le fait que de proche en proche les nœuds disposeront d'informations plus précises. Il vaut mieux dans ces conditions privilégier la qualité des liaisons avec les nœuds proches, et par conséquent, donner la priorité à la sélection des MPR plutôt qu'à la construction de la topologie par les TC. Une fois de plus, c'est l'approche 2 qui permet le mieux de réaliser cette option.

La question particulière des liaisons asymétriques

Plusieurs auteurs, notamment Leguay et al. [85] en ce qui concerne OLSR, suggèrent d'utiliser les liaisons asymétriques pour profiter pleinement des ressources du réseau. Les choix opérés au paragraphe ci-dessus nous contraignent à ne pas considérer cette possibilité dans le cas du protocole OLSR. De ce point de vue, notre approche reste en conformité avec la spécification actuelle définie dans le RFC [4]. Pour illustrer l'impossibilité d'utiliser les liaisons asymétriques, reprenons l'exemple de la figure 5.7. Supposons que :

- la liaison soit asymétrique ;
- que le nœud 8 ait déjà reçu un message HELLO en provenance du nœud 4, mais que ce dernier n'ait encore rien reçu du nœud 8 ;

Le nœud 8 dispose donc des valeurs des métriques de QoS estimées pour la liaison (4, 8). Cette liaison étant entrante, elle n'est pas utilisée pour la sélection des MPR dans notre approche. Par conséquent :

- le nœud 4 ne sera jamais sélectionné comme MPR par le nœud 8 ;
- le nœud 8 n'aurait aucun intérêt à lui confier la retransmission d'un quelconque message à QoS étant donné qu'il n'a aucune idée sur la qualité de la liaison (8,4) ;
- aucun nœud du réseau ne confiera au nœud 4 un message destiné au nœud 8 parce que rien dans la table des voisins ni dans la topologie locale du nœud 4 n'indiquerait qu'il dispose d'une route vers le nœud 8 dont il ignore l'existence.

Une liaison asymétrique n'offre aucune garantie ne serait-ce que sur la connectivité, rien ne justifie d'y recourir pour acheminer un trafic sujet à des contraintes de QoS.

5.1.3 Sélection des relais multipoints (MPR)

Nous avons utilisé quatre métriques pour évaluer l'heuristique générique proposée au chapitre 4. Les résultats obtenus montrent qu'elle permet une sélection efficace des MPR, malgré la prise en compte simultanée de quatre métriques. Nous l'avons donc mis en œuvre dans Q-OLSR en conservant les valeurs des paramètres de fonctionnement utilisées en 4.2.2. Nous avons également conservé les mêmes métriques pour les paramètres de QoS et dans le même ordre de préférence, à savoir (B , D , P , W). Leurs valeurs sont obtenues en utilisant les méthodes d'estimation présentées en 5.1.2. Les métriques choisies peuvent être remplacées par d'autres à condition que leurs valeurs soient reportées sur l'intervalle de référence $[0, 100]$ en appliquant une fonction de mise à l'échelle similaire à celles suggérées dans les propositions 1 et 2 présentées en section 3.1.1.

5.1.4 Calcul des routes

L'algorithme de calcul des routes proposé dans la spécification du protocole OLSR [4] minimise le nombre de sauts entre la source et chaque destination. Dans [51], les auteurs proposent un algorithme qui recherche les routes vers toutes les destinations présentant la meilleure valeur pour le débit. Ils proposent également d'appliquer le routage à source dans OLSR pour les flux à qualité de service. D'autres approches mentionnées en section 2.4,

notamment [72] et [73] proposent des algorithmes de calcul des routes de meilleur compromis sur trois ou quatre métriques vers chaque destination.

Dans Q-OLSR, nous avons opté pour une approche qui limite l'effort algorithmique pour le calcul des routes. En effet, OLSR étant un protocole proactif, au moment où les routes sont calculées, il n'existe pas forcément des demandes de routes respectant des valeurs spécifiques pour les paramètres de la QoS. De plus, toutes les destinations ne seront pas forcément concernées par du trafic imposant des contraintes de QoS. Nous avons donc opté pour un effort minimal lors du calcul proactif des routes. Contrairement à la spécification du RFC, dans Q-OLSR nous calculons toutes les routes de longueur inférieure ou égale à $h+1$ vers chaque destination retenue, h étant le nombre de sauts minimum vers cette destination. Nous appliquons à ces routes la fonction score $| \cdot |_0$ définie en section 3.1.3 pour sélectionner celle qui réalise globalement le meilleur compromis sur les valeurs de toutes les métriques considérées.

5.2 Evaluation de Q-OLSR

Le but n'est pas de proposer un nouveau protocole de routage pour les MANET, mais une version d'OLSR qui intègre la prise en compte des paramètres de la qualité de service dans son fonctionnement de base. La version Q-OLSR proposée conserve essentiellement les mêmes caractéristiques que le protocole OLSR natif. Il est donc susceptible d'avoir le même comportement asymptotique. Une évaluation analytique fera difficilement ressortir l'ensemble de ses points faibles et de ses points forts en comparaison avec OLSR natif. Un testbed constitué d'équipements sans fil peut servir à évaluer le protocole proposé dans le cadre d'une application spécifique. La mise en œuvre d'un testbed permettant d'atteindre des densités suffisamment importantes pour faire ressortir les apports du routage à qualité de service présente quelques difficultés, notamment d'ordre matériel. Le bon compromis entre ces deux méthodes d'évaluation est la simulation. En effet, il est possible d'évaluer le protocole en prenant en compte de nombreux facteurs simultanément : des trafics variés, des environnements divers, des réseaux de tailles et de densités variées.

5.2.1 L'Outil de l'évaluation: l'OPNET Modeler

La suite OPNET modeler fournit de nombreux modèles et outils pour la modélisation, la simulation et l'analyse des performances des réseaux. Nous présentons uniquement les

modules et composants qui ont été effectivement utilisés dans le cadre de nos travaux. La suite Modeler comprend un environnement de modélisation graphique et un menu permettant d'accéder aux fonctionnalités du simulateur ainsi qu'à des modules optionnels (figure 5.8). Une documentation complète décrivant tous les modules, les concepts clés relatifs à chaque modèle ainsi que les fonctions, les variables et les valeurs utilisables pour les différents paramètres est accessible en local, et est complétée par le site d'OPNET¹⁴.

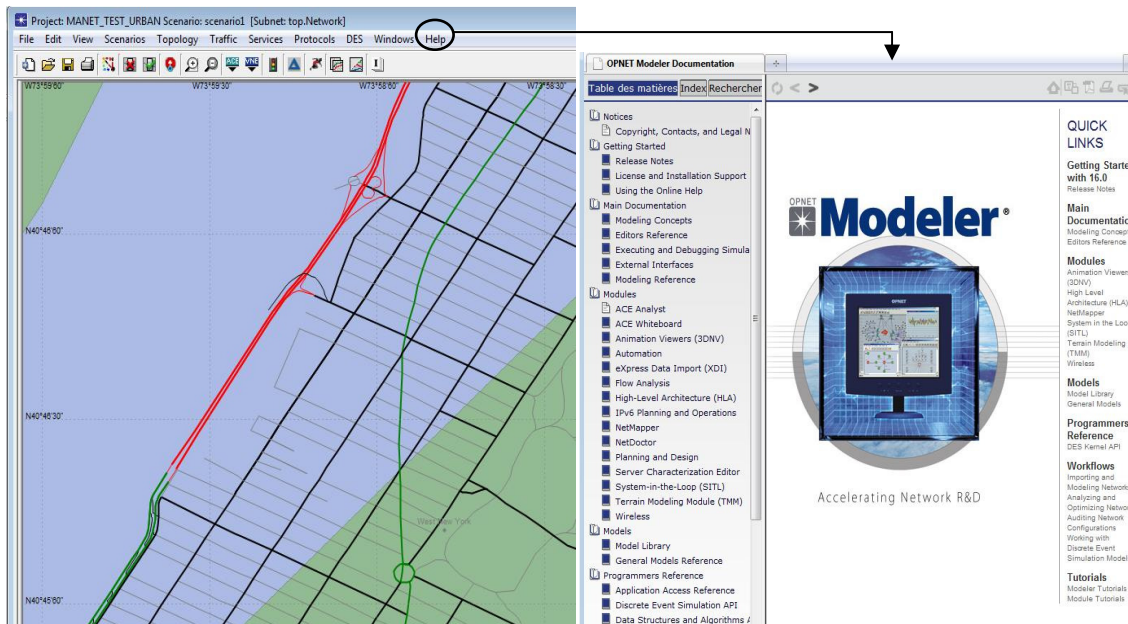


Figure 5.8 Interface du Modeler 16.0 et module d'aide à l'utilisateur

Déploiement d'un réseau sans-fil ad hoc

Le menu *Topology* permet d'accéder à un Assistant de déploiement de réseau sans fil aussi bien en mode Infrastructure qu'en mode Ad hoc. L'utilisateur définit l'espace de déploiement qui peut être un lieu géographique réel, comme Manattan dans l'exemple de la figure 5.8, ou un espace logique non rattaché à un lieu géographique particulier. Après avoir défini les dimensions et la surface couverte par les nœuds, il détermine la technologie utilisée ainsi que le protocole de routage comme illustré en figure 5.9. Une fois le nombre de nœuds, leur disposition et leur profil de mobilité définis, l'Assistant affiche un résumé du déploiement.

¹⁴ www.opnet.com

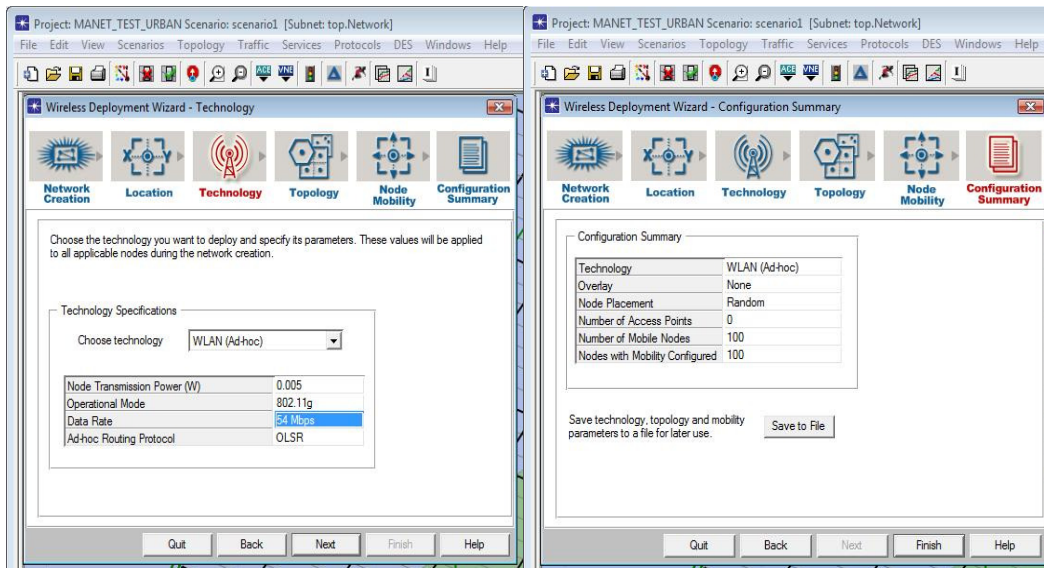


Figure 5.9 Assistant de déploiement de réseau sans-fil

Topologie et trajectoires personnalisées

Les nœuds peuvent être déplacés directement au travers de l’interface graphique. Il est possible de définir des trajectoires personnalisées pour les faire coïncider notamment avec les rues d’une localisation géographique. Une trajectoire est une succession de positions de références auxquelles peuvent être rattachés des temps de pause (figure 5.10). Le trajet entre deux positions de références successives est une droite à laquelle peut être associée une vitesse, le temps de traversée est calculé automatiquement grâce à ces données.

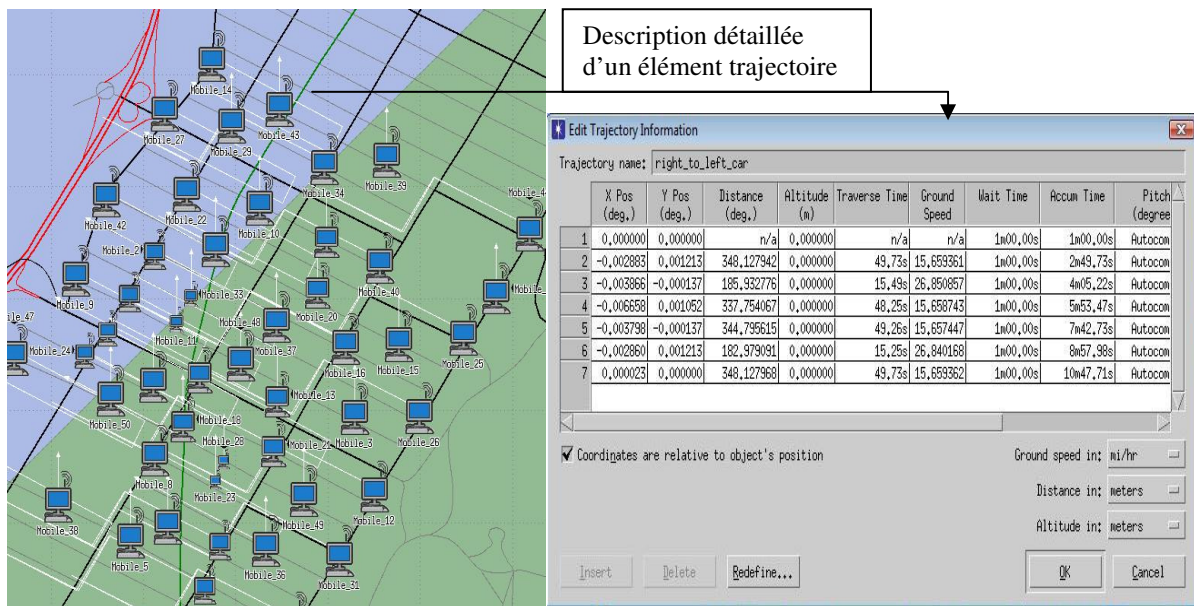


Figure 5.10 Définition de topologie et de trajectoires personnalisées

Déploiement d'une application

Une fois le réseau déployé, il est possible de définir soi-même une application ou de personnaliser une des applications prédéfinies dans le Modeler. La figure 5.11 montre un exemple d'application obtenue en personnalisant l'application Vidéoconférence. Un profil d'utilisation doit être associé à toute application définie avant son déploiement. Le profil détermine la manière dont l'application est exécutée et sa durée dans le cadre de la simulation. Des profils prédéfinis personnalisables sont proposés dans le Modeler. Une fois, les applications et les profils définis, le menu *Protocols*→*Applications* permet de la déployer en précisant les sources ainsi que les destinations comme illustré sur la figure 5.11.

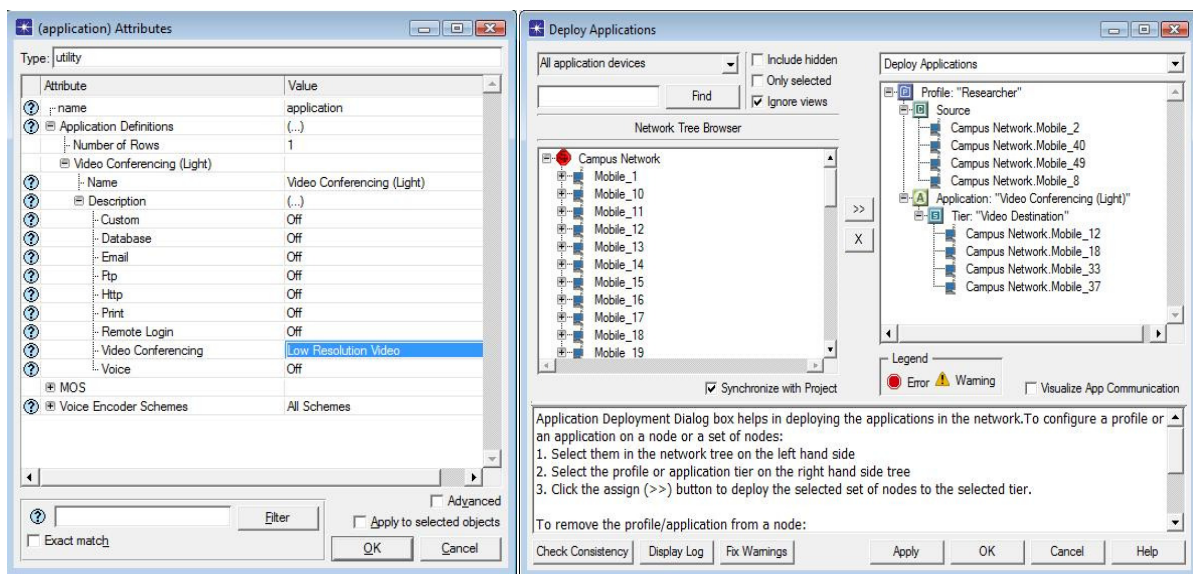


Figure 5.11 Configuration et déploiement d'applications

Sélection des valeurs statistiques pour les résultats

Une fois le réseau déployé et les applications configurées, il est possible d'accéder via le menu *DES*→*Choose Individual Statistics* à la sélection des valeurs statistiques souhaitées en résultats pour analyser les performances. Les statistiques disponibles concernent aussi bien les applications choisies, les protocoles impliqués à tous les niveaux de la création d'un paquet sur le nœud source à son traitement par l'application correspondante sur le nœud destination, ainsi que divers matériels modélisés. Seuls les résultats relatifs aux statistiques sélectionnées seront disponibles à la fin de la simulation. La figure 5.12 illustre d'une part les statistiques sélectionnées, et d'autre part les résultats associés à l'une d'elles.

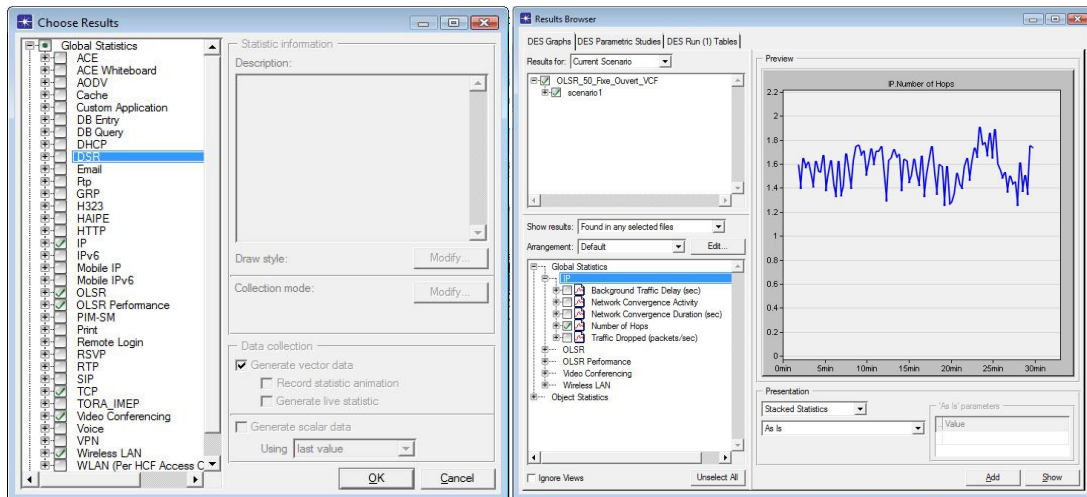


Figure 5.12 Sélection des valeurs statistiques

Configuration et exécution des simulations

Au terme de ce processus, il est possible d'exécuter une simulation pour obtenir les performances dans les conditions définies à travers toutes les étapes précédentes.

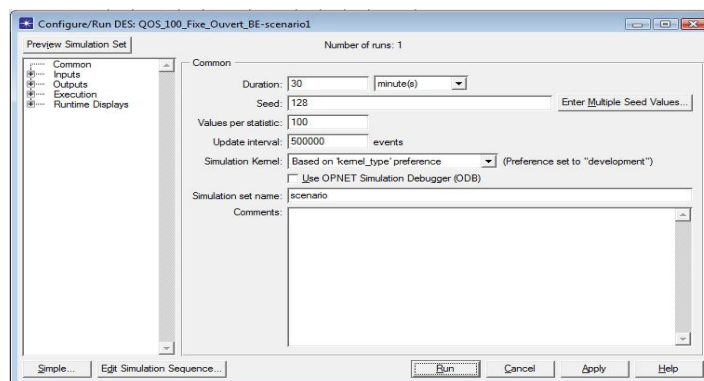


Figure 5.13 Configuration de la simulation

La fenêtre de configuration de la simulation (figure 5.13) est accessible via le menu *DES*→*Configure/Run Discrete Event Simulation*, elle permet de définir la durée de la simulation, le nombre de fois que le scénario doit être exécuté ainsi que d'autres paramètres, tous expliqués dans l'aide.

5.2.2 Implémentation de Q-OLSR dans OPNET

La suite OPNET Modéliser 16.0 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 base de paramètres initialisés à des valeurs par défaut, mais que l'utilisateur peut modifier à sa guise. Il est également possible d'accéder au code de chaque modèle et d'en modifier le fonctionnement à des fins de recherche, le modèle obtenu peut être sauvegardé sous un nom différent. De nombreux modèles ainsi modifiés sont disponibles dans l'espace de partage des utilisateurs d'OPNET sur le site officiel. Le composant Routing Manager (`manet_rte_mgr` sur la figure 5.14) est responsable de l'initialisation du protocole de routage choisi sur la station. Pour les réseaux mobiles ad hoc, le Modeler 16.0 propose le choix entre les protocoles de routage DSR [2], AODV [3], OLSR [4], TORA [21], OSPFv3 [86] et GRP¹⁴. Un protocole de routage peut donc très simplement être remplacé par un autre sur une station sans entraîner aucune modification sur les autres composants dans la modélisation de la station.

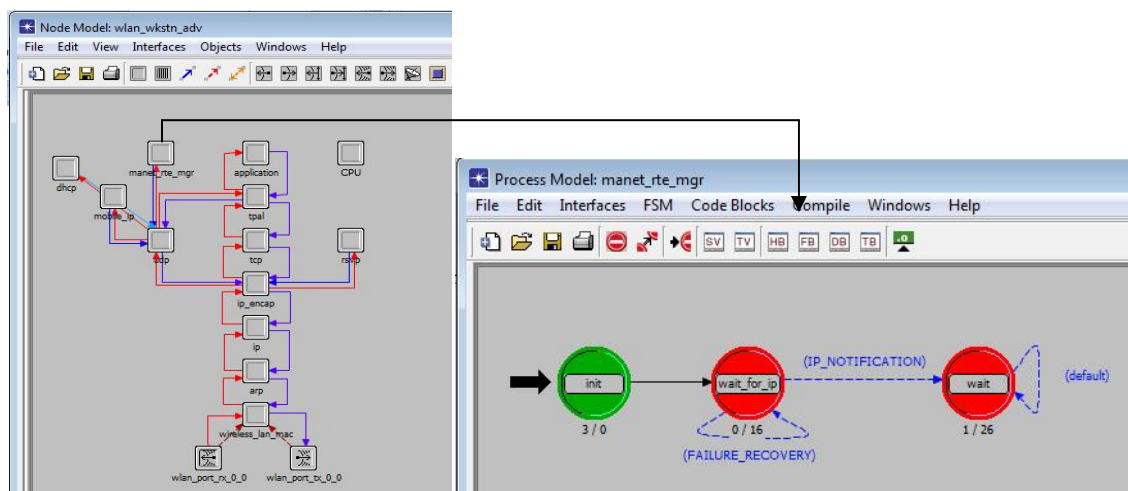


Figure 5.14 Modèle d'une station de travail équipée d'une carte sans fil

L'implémentation du protocole OLSR proposé est conforme au RFC 3626 [4] en ce qui concerne les principales fonctionnalités. Nous n'en présentons que les parties utiles à la compréhension des modifications que nous y avons apportées pour obtenir Q-OLSR.

Modèle d'OLSR natif dans OPNET

Le protocole OLSR est disponible sous la forme d'un *process model* représenté par des états et des transitions (figure 5.15). 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 de routes.

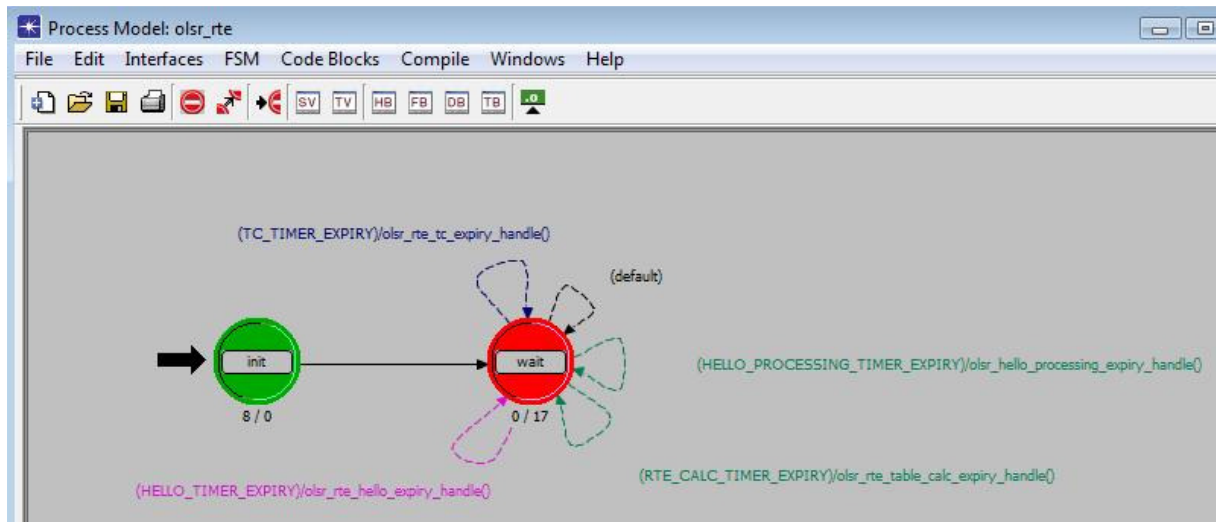


Figure 5.15 Process Model du protocole OLSR dans OPNET

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 en-tête 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++, mais de nombreuses fonctions sont implémentées dans une API d'OPNET et il suffit de les invoquer. La description complète et détaillée de toutes les API utilisables est disponible dans l'aide locale, et un FAQ disponible en ligne sur le site officiel fournit des solutions à un très grand nombre de questions liées au développement et à l'exécution. Le modèle écrit en C/C++ ressemble en grande partie aux implémentations réelles d'OLSR, sa description détaillée n'est pas nécessaire dans le cadre de ce mémoire, elle reviendrait à décrire le protocole OLSR.

Modèle de Q-OLSR dans OPNET

Afin de préserver la compatibilité avec les autres composants, Q-OLSR conserve la même structure qu'OLSR et son invocation se fait par le biais du Routing Manager. Aucun mécanisme de cross-layer n'a été mis en œuvre avec les autres couches. Nous avons précisé dans les objectifs de cette thèse que nous limitons notre travail pour garantir la qualité de service à la mise en œuvre de mécanismes uniquement au niveau du routage. Par conséquent, les performances obtenues sont également imputables aux seuls mécanismes mis en œuvre pour le routage à qualité de service. Les modifications introduites dans le modèle du protocole

OLSR natif, dans l'optique de mettre en œuvre les mécanismes proposés, peuvent être résumées ainsi :

- Les fichiers d'en-tête contenant les définitions des structures de données associées aux messages HELLO et TC sont modifiés afin d'introduire les informations nécessaires au traitement des paramètres de la QoS tel que décrit en section 5.1.2 ;
- Les structures de données représentant les tables des voisins à un et deux sauts, ainsi que les liens sont modifiées afin de conserver les informations de localisation, les informations de qualité de service associées aux liaisons, les associations entre les voisins à deux sauts et les MPR sélectionnés pour la qualité de service. Les fonctions associées à ces opérations sont modifiées en conséquence ;
- L'heuristique de sélection des MPR est remplacée par une version de *QH* prenant en compte quatre métriques semblable à celle qui a été évaluée au chapitre 4 ;
- 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 ;
- Pour le calcul de 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 principale réalisant le meilleur score (voir section 5.1.4).

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

5.2.3 Scenarios utilisés pour les évaluations

Cette section décrit les scenarios qui ont servi à l'évaluation comparative des performances de Q-OLSR par rapport au protocole OLSR best-effort. Afin de tester les deux protocoles dans des situations variées permettant de faire ressortir leurs points forts et leurs points faibles, les scenarios varient en fonction de l'environnement dans lequel se trouve le réseau, le nombre et le profil de mobilité des nœuds qui participent au réseau ainsi que le type de trafic à acheminer. En combinant ces différents paramètres, on obtient 24 scenarios.

Les environnements

Le réseau recouvre un espace de 1000x1000 m². Deux types d'environnements ont été considérés.

Le premier est un milieu ouvert sans bâtiment. Il peut être associé à un champ de bataille ou une manifestation ponctuelle en extérieur. Les nœuds peuvent s'y mouvoir sans contraintes. Le second est une agglomération presque entièrement couverte de buildings et où les nœuds ne peuvent se déplacer qu'à travers des rues longeant ou séparant les bâtiments. Les deux environnements sont illustrés en figure 5.16 ci-dessous.

Pour l'environnement urbain, nous avons choisi de le localiser géographiquement dans le centre de Manhattan dont la carte détaillée des rues est disponible dans OPNET Modeler. L'environnement ouvert n'est associé à aucune région géographique. Les buildings ne sont pas visibles, mais les modèles de propagation appliqués correspondent à ceux relevés dans cette zone en prenant en compte les buildings.

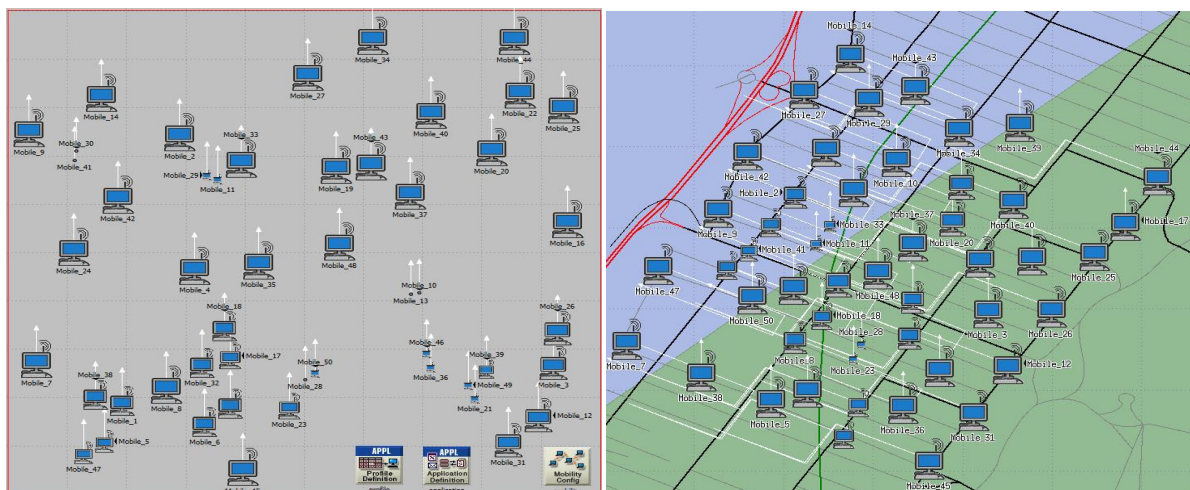


Figure 5.16 Environnement ouvert et environnement urbain

Le nombre de nœuds

Les performances sont évaluées pour des applications utilisables dans un contexte réaliste. Il peut s'agir d'une communauté d'utilisateurs sur un campus ou dans une ville, des participants à une intervention militaire ou à des opérations de secours suite à une catastrophe naturelle, un accident de transport ou un attentat terroriste. Les simulations ont été faites pour des MANET comprenant 50 ou 100 nœuds.

Les paramètres du protocole de routage et de la couche MAC

Les paramètres associés au protocole de routage ainsi qu'à la couche MAC ont été maintenus à leurs valeurs par défaut dans OPNET. Ce dernier reprend les valeurs proposées par le RFC 3626 pour les paramètres associés à *OLSR*. Nous avons appliqué exactement les mêmes valeurs à *Q-OLSR*, et ce pour tous les scénarios. Une gigue de 0.5s est utilisée dans l'implémentation d'*OLSR* dans OPNET lors de la retransmission des messages TC. Nous avons également adopté cette valeur lors de l'implémentation de *Q-OLSR*.

Les nœuds sont tous équipés de carte de communication basée sur la technologie 802.11g. Les paramètres de fonctionnement de ces cartes en mode ad hoc ont également été maintenus à leurs valeurs par défaut tel que proposé dans OPNET. Aucune valeur spécifique n'est fournie sur la portée des communications, mais nous avons parfois observées des communications entre des nœuds ayant presque 300 m de distance (distance limite autorisée dans un BSS).

La figure 5.17 représente un extrait de la configuration d'un nœud du réseau. On peut y retrouver clairement les valeurs de tous les paramètres évoqués ci-dessus :

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| [-] 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 |
| [-] TORA/IMEP Parameters | Default |
| [-] Applications | |
| [-] H323 | |
| [-] CPU | |
| [-] VPN | |
| [-] DHCP | |
| [-] IP Multicasting | |
| [-] IP | |
| [-] NHRP | |
| [-] SIP | |
| [-] Servers | |
| [-] Wireless LAN | |
| Wireless LAN MAC Address | Auto Assigned |
| [-] Wireless LAN Parameters | (...) |
| BSS Identifier | 0 |
| Access Point Functionality | Disabled |
| Physical Characteristics | Extended Rate PHY (802.11g) |
| Data Rate (bps) | 54 Mbps |
| [-] Channel Settings | (...) |
| Bandwidth (MHz) | Physical Technology Dependent |
| Min Frequency (MHz) | BSS Based |
| Transmit Power (W) | 0.005 |
| Packet Reception-Power Threshold... | -95 |
| Rts Threshold (bytes) | None |
| Fragmentation Threshold (bytes) | None |
| CTS-to-self Option | Enabled |
| Short Retry Limit | 7 |
| Long Retry Limit | 4 |
| AP Beacon Interval (secs) | 0.02 |
| Max Receive Lifetime (secs) | 0.5 |
| Buffer Size (bits) | 256000 |
| Roaming Capability | Disabled |
| Large Packet Processing | Drop |
| [-] PCF Parameters | Disabled |
| [-] HCF Parameters | Not Supported |

Figure 5.17 Caractéristiques des trafics best-effort

Les profils de mobilité

Trois profils de mobilité ont été considérés durant les simulations :

- le premier correspond à un réseau où tous les nœuds sont fixes. Le but est d'une part d'évaluer les performances qui pourraient être obtenues dans un réseau ad hoc où les nœuds sont fixes, notamment un réseau de capteurs, et d'autre part, d'observer par comparaison l'influence de la mobilité sur les performances.
- le second profil correspond à des stations se déplaçant au rythme de la marche ou de la course à pied. Les vitesses varient de 1 m/s à 3m/s.
- le troisième correspond à celui de véhicules se déplaçant dans le cadre d'une opération en milieu ouvert ou en agglomération. Les vitesses varient de 10m/s à 15m/s.

Les déplacements en milieu ouvert se font suivant le modèle de mobilité Random Waypoint [82]. Ceux survenant en milieu urbain suivent des trajectoires prédéfinies coïncidant avec les rues. Dans tous les profils mobiles, les nœuds observent parfois des temps de pause de l'ordre de 30s à 60s.

Les types de trafic

Nous avons considéré le trafic best-effort et le trafic d'une application à très fortes contraintes de QoS pour les évaluations.

Le trafic best-effort est celui généré par deux applications, à savoir une application mail et une application d'échange de fichiers.

Dans l'application mail, le client envoie une requête pour relever des mails. En guise de réponse, le serveur lui notifie la réception de ladite requête avant de lui envoyer effectivement le contenu du mail. Dans l'application 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 sa version intégrant les mécanismes de qualité de service sans entraîner une dégradation des performances. La figure 5.18 montre les caractéristiques des deux applications. Chacune des applications best-effort implique 8 serveurs et 16 clients dans les réseaux à 100 nœuds ou 4 serveurs et 8 clients dans les réseaux à 50 nœuds. Dans tous les scénarios, les applications sont déployées simultanément.

| Attribute | Value |
|-------------------------------------|-------------------|
| Send Interarrival Time (seconds) | exponential (360) |
| Send Group Size | constant (3) |
| Receive Interarrival Time (seconds) | exponential (360) |
| Receive Group Size | constant (3) |
| E-Mail Size (bytes) | constant (2000) |
| Symbolic Server Name | Email Server |
| Type of Service | Best Effort (0) |
| RSVP Parameters | None |
| Back-End Custom Application | Not Used |

| 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 5.18 Caractéristiques des trafics best-effort

Le trafic imposant des contraintes de qualité de service est généré par une application *vidéoconférence* (figure 5.19) 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 Q-OLSR au routage à qualité de service sans aucun recours à des mécanismes tels que la réservation de ressources ou tout autre mécanisme fourni au niveau des autres couches du modèle OSI.

Une session vidéoconférence s'établit entre un nœud configuré comme source et un autre configuré comme destination lors du déploiement de l'application. Les couples (source, destination) peuvent changer aléatoirement d'une session à l'autre dans le cadre d'une même simulation. Cette application implique simultanément 5 sources et 5 destinations dans les réseaux à 100 nœuds ou 4 sources et 4 destinations dans les réseaux à 50 nœuds.

| Attribute | Value |
|-------------------------------------|-------------------|
| Frame Interarrival Time Information | 10 frames/sec |
| Frame Size Information (bytes) | 128x120 pixels |
| Symbolic Destination Name | Video Destination |
| Type of Service | Best Effort (0) |
| RSVP Parameters | None |
| Traffic Mix (%) | All Discrete |

Figure 5.19 Caractéristiques de l'application vidéoconférence

5.2.4 Résultats des évaluations

Plusieurs évaluations ont déjà été proposées à travers les articles publiés au cours de cette thèse. Une première évaluation comparative entre Q-OLSR et OLSR est proposée sur l'acheminement de la voix dans les réseaux mobiles ad hoc [87]. Les résultats établissent que Q-OLSR améliore le taux de réception, le délai ainsi que la gigue. Dans [88], nous avons proposé une évaluation des performances obtenues par Q-OLSR sur l'acheminement de la

voix dans un MANET en présence de trafics générés par des applications best-effort. Une évaluation de l'impact de la mobilité sur la qualité de la réception de la voix est également proposée. Nous y montrons notamment que le taux de réception ainsi que la qualité de la voix ne sont que faiblement impactés par la présence d'un trafic best-effort. En revanche, lorsque les nœuds sont mobiles, le taux de réception baisse et la qualité des communications atteint le seuil minimum acceptable selon la valeur du MOS¹⁵.

Le protocole Q-OLSR a également été évalué dans le contexte d'une application spécifique que nous avons proposée [89] pour la surveillance et la collecte d'images en temps réel dans le cadre d'opérations militaires, policières ou de secours menées en milieu urbain. Cette collecte se fait à partir des nœuds particuliers dotés d'une capacité de stockage, le nœud S sur la figure 5.20, et qui téléchargent des images prises par les caméras embarquées sur les équipements des hommes de troupe évoluant sur le terrain. Une telle application complète les systèmes de suivi des opérations basés sur l'observation par satellite ou depuis des unités aéroportées qui ne voient pas ce qui arrive à l'intérieur des bâtiments ou dans les rues étroites.

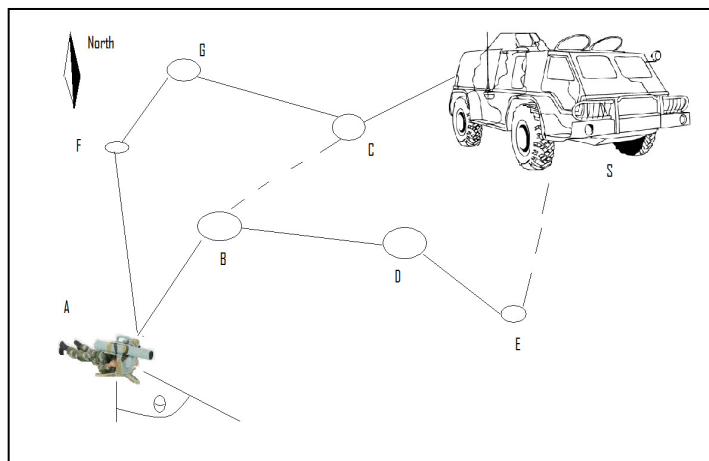


Figure 5.20 Application de suivi de troupes en temps réel

Dans un premier scenario, chaque homme de troupe envoie périodiquement un fichier contenant une séquence vidéo réalisée sur une certaine période au collecteur qui agit alors comme un serveur FTP. Dans le second scenario, le collecteur se connecte à la caméra d'un homme de troupe qui agit comme un serveur HTTP et il télécharge en temps réel les images prises par ce dernier. Les robots proposés par certaines sociétés¹⁶ fonctionnent sur ce principe. Nous montrons que l'utilisation du protocole FTP permet d'obtenir un taux de réception largement supérieur à celui fourni par le protocole HTTP, mais les délais observés alors sont

¹⁵ Mean Opinion Score : le score minimum est de 3 pour une qualité passable.

¹⁶ <http://www.wifibot.com/index.php>

de l'ordre de la dizaine de secondes. Ce scénario convient pour la collecte d'images devant être traitées ultérieurement par exemple pour des besoins d'investigations. Le délai obtenu en utilisant le protocole HTTP reste de l'ordre de la demi-seconde, mais le taux de réception est alors plus faible. Nous estimons que la surveillance en temps réel d'opérations aussi délicates peut se faire au prix de la qualité des images, mais pas à celui d'un délai trop élevé. Une comparaison avec les résultats obtenus par le protocole OLSR natif montre que Q-OLSR obtient plus régulièrement des délais plus courts.

Les évaluations présentées dans ce mémoire complètent donc cette série. Le but est de présenter des évaluations homogènes dans des conditions clairement précisées. Toutes les simulations représentent 30 minutes du fonctionnement d'un MANET. Les différentes applications commencent à générer leur trafic à peu près au bout d'une minute afin de permettre la constitution du réseau.

Performances globales des protocoles

Dans un premier temps, les évaluations servent à montrer que Q-OLSR peut être utilisé en lieu et place du protocole OLSR natif pour acheminer le trafic des applications best-effort sans aucune dégradation des performances. Cette démonstration est d'autant plus cruciale que Q-OLSR introduit un trafic supplémentaire nécessaire à la dissémination des informations des paramètres de la qualité de service. Observons d'abord le trafic de contrôle supplémentaire inhérent à la dissémination des paramètres de QoS par le biais des messages HELLO et TC. Le trafic présenté dans les graphiques suivants représente la quantité totale en octets par seconde des HELLO et TC émis dans le MANET.

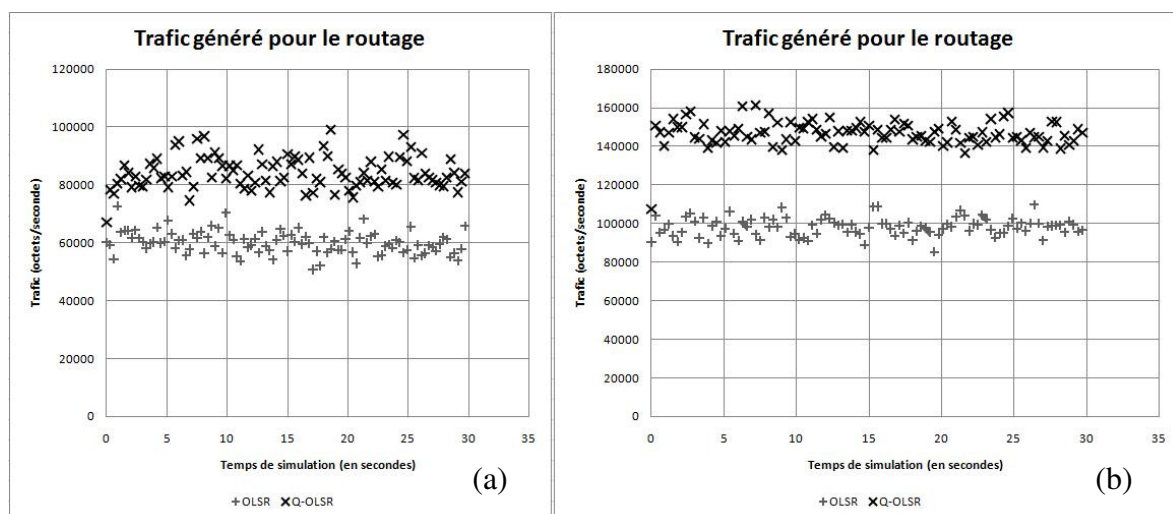


Figure 5.21 Trafic pour 50 nœuds fixes en milieu a) ouvert et b) urbain

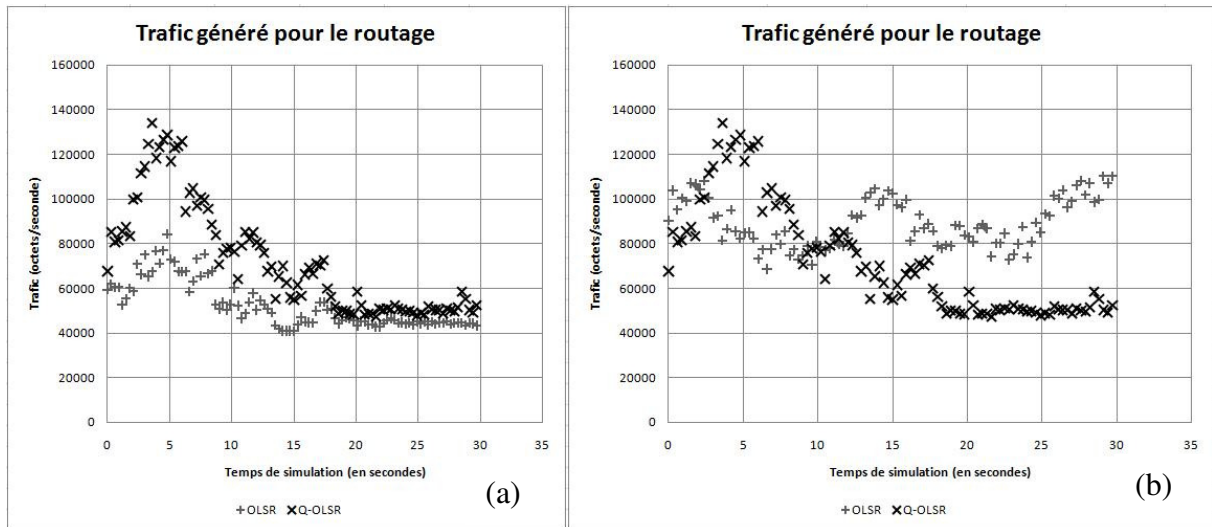


Figure 5.22 Trafic pour 50 piétons en milieu a) ouvert et b) urbain

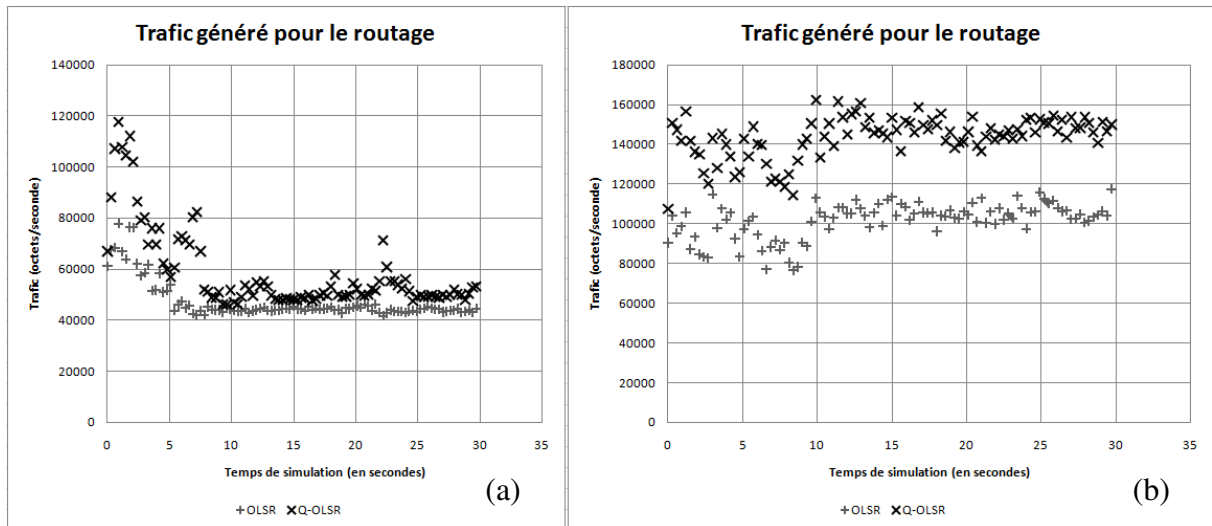


Figure 5.23 Trafic pour 50 véhicules en milieu a) ouvert et b) urbain

Le trafic de contrôle supplémentaire dû à la diffusion des informations de qualité de service peut atteindre 50% du trafic généré par OLSR natif (figure 5.21). On réalise dès lors le coût introduit pour la mise en œuvre de la qualité de service rien qu’au niveau du protocole de routage. Il est donc plus que nécessaire dans ces conditions de maintenir une optimisation de la diffusion pour éviter la dégradation des performances. On observe cependant que ce trafic supplémentaire se réduit fortement avec la mobilité des nœuds, en particulier en milieu ouvert (figures 5.22.a et 5.23.a). Le phénomène est moins régulier en milieu urbain (figures 5.22.b et 5.23.b) où la présence des buildings modifie complètement la topologie réelle par l’apparition de nœuds cachés suite aux obstacles. Des résultats analogues sont observés sur les réseaux contenant 100 nœuds (figures 5.24, 5.25 et 5.26).

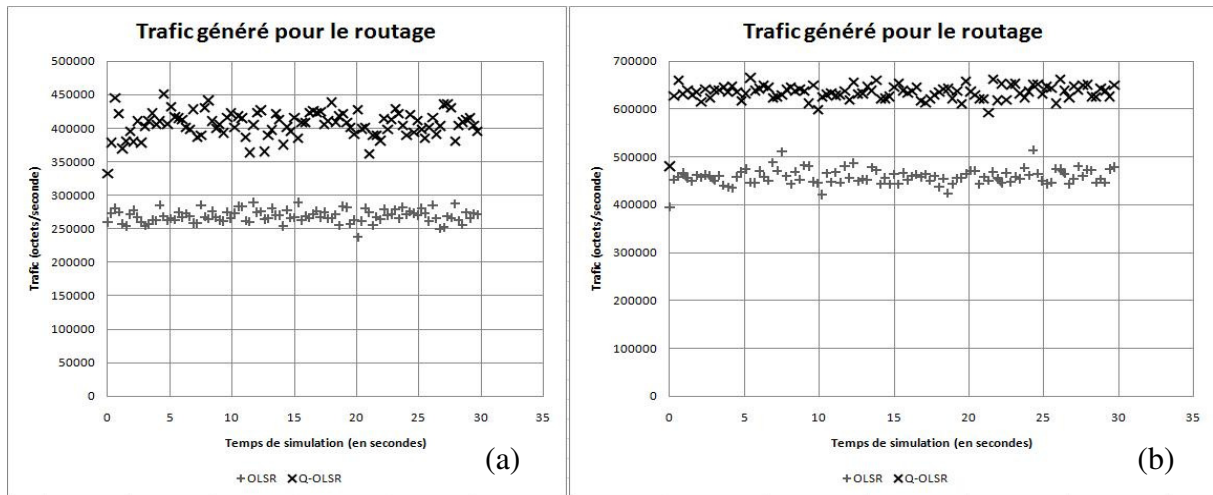


Figure 5.24 Trafic pour 100 nœuds fixes en milieu a) ouvert et b) urbain

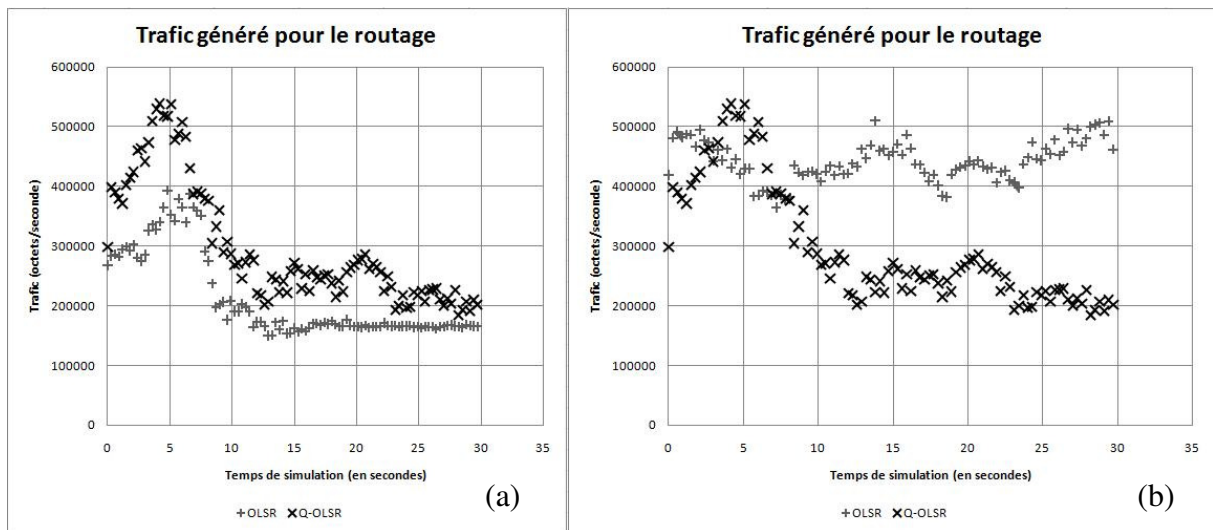


Figure 5.25 Trafic pour 100 piétons en milieu a) ouvert et b) urbain

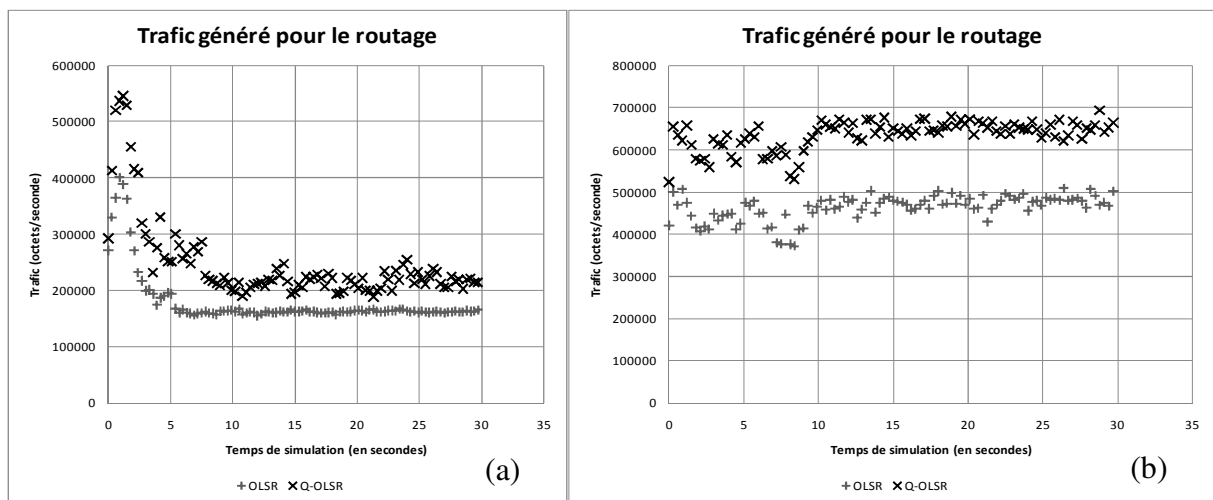


Figure 5.26 Trafic pour 100 véhicules en milieu a) ouvert et b) urbain

Nous reprenons en figures 5.27 et 5.28 les moyennes des trafics de routage générés dans les réseaux formés respectivement de 50 et 100 nœuds. Malgré l'importance du trafic additionnel généré par Q-OLSR, ce dernier parvient à optimiser l'utilisation des ressources et à offrir un débit disponible (*throughput*) globalement plus élevé que celui obtenu avec OLSR natif. Les figures 5.29 et 5.30 illustrent ces valeurs respectivement pour 50 et 100 nœuds. On observe que le débit disponible est légèrement inférieur en milieu urbain, et qu'une faible mobilité favorise légèrement cette métrique. La densité entraîne un rapprochement des nœuds les uns des autres, cela décuple le débit total disponible dans le WLAN (Wireless LAN). Mais ce débit est partagé par 100 nœuds contre seulement 50 dans un MANET à densité plus faible.

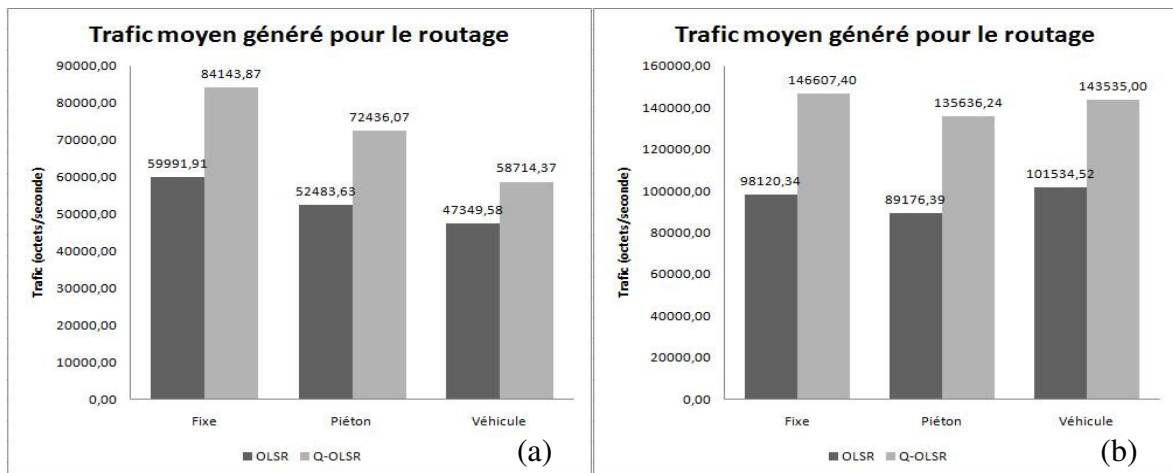


Figure 5.27 Trafic moyen pour 50 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

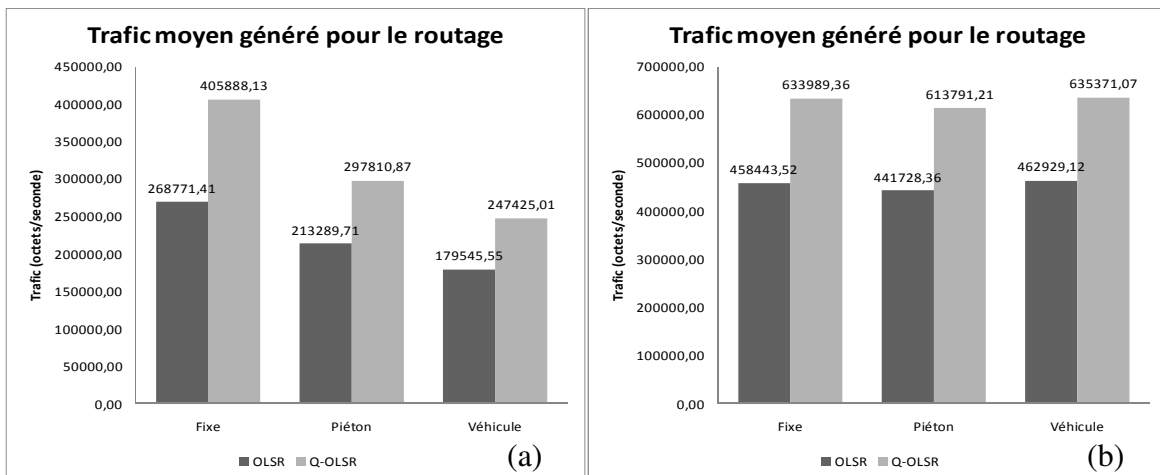


Figure 5.28 Trafic moyen pour 100 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

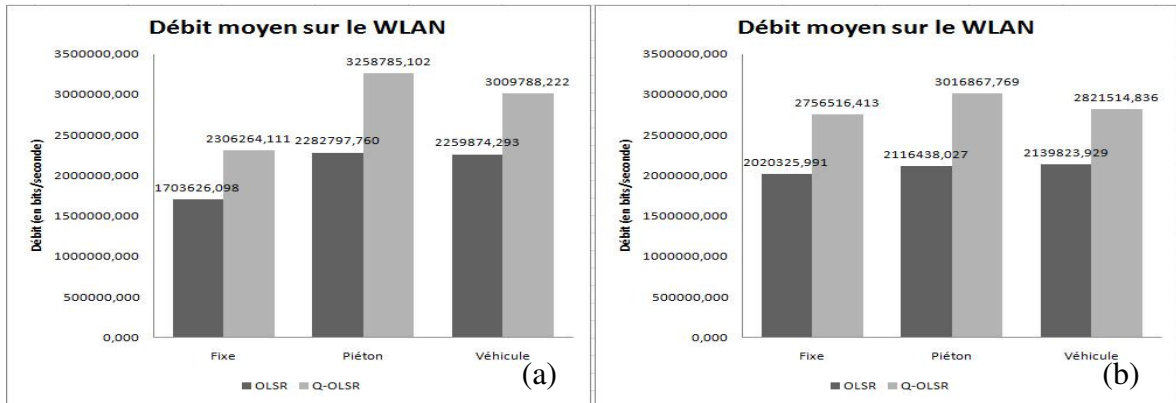


Figure 5.29 Débit moyen pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

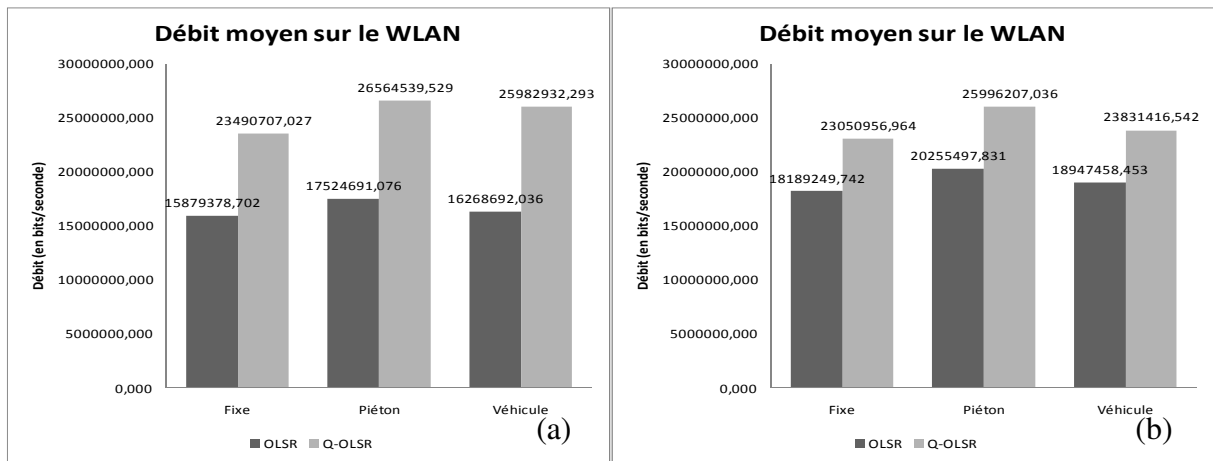


Figure 5.30 Débit moyen pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

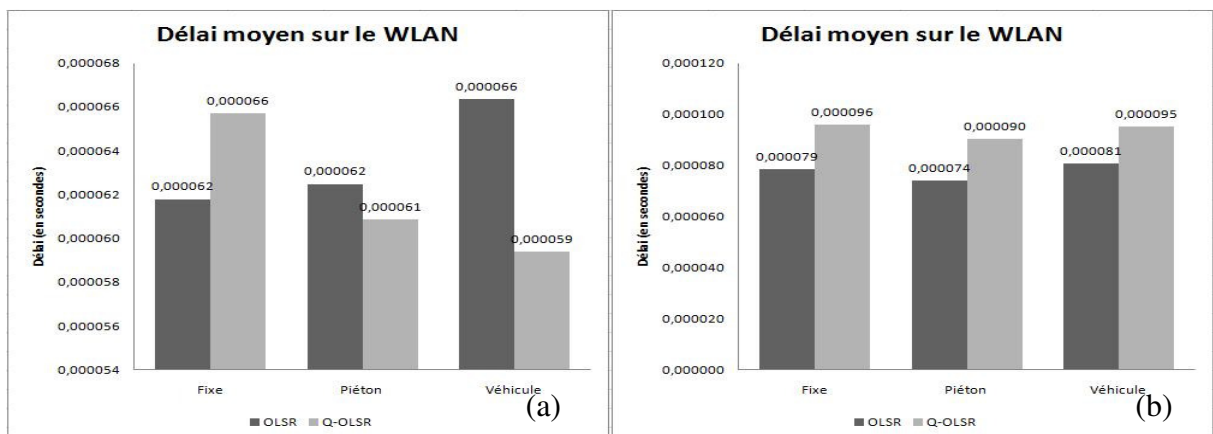


Figure 5.31 Délai moyen pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

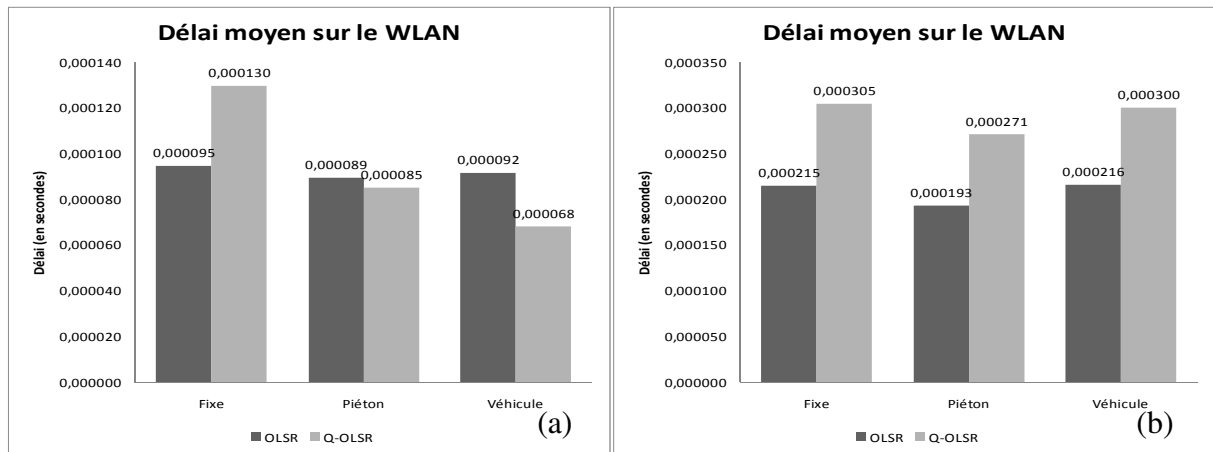


Figure 5.32 Délai moyen pour 100 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Conformément aux observations de Ge et al. [36], la mise en œuvre de la qualité de service entraîne inéluctablement une augmentation du délai. Cette augmentation est observée au niveau du WLAN et peut atteindre jusqu'à 30% (figures 5.31 et 5.32). Néanmoins, dans certaines situations, notamment en milieu ouvert et en présence de nœuds mobiles, on peut observer une baisse du délai qui suit sans doute la baisse du trafic de routage. En milieu urbain, le délai reste invariablement plus élevé avec Q-OLSR par rapport à OLSR natif.

De ces premières évaluations, il ressort que la mise en œuvre de la qualité de service avec Q-OLSR se solde par un trafic de contrôle additionnel qui occasionne une augmentation du délai dans le MANET. Néanmoins, avec Q-OLSR le débit observé dans le réseau est plus élevé comparativement à OLSR natif. Il s'agit maintenant de voir dans quelle mesure ces changements ont un impact sur les performances des applications déployées sur le MANET.

Performances pour les applications best-effort

Le nombre de sauts moyen observé dans OLSR natif et Q-OLSR, respectivement dans les MANET à 50 (figure 5.33) et 100 nœuds (figure 5.34) montre que Q-OLSR propose des routes légèrement plus longues. Dans Q-OLSR, la probabilité de réception correcte liée à la distance entre en compte dans les choix à la fois des MPR et des routes. Par conséquent, les nœuds choisissent comme MPR des nœuds généralement proches du point de vue de la distance pour garantir une bonne probabilité de réception. Ainsi, deux nœuds situés à égale distance euclidienne obtiendront plus souvent une route comportant plus de sauts avec Q-OLSR comparativement à OLSR natif.

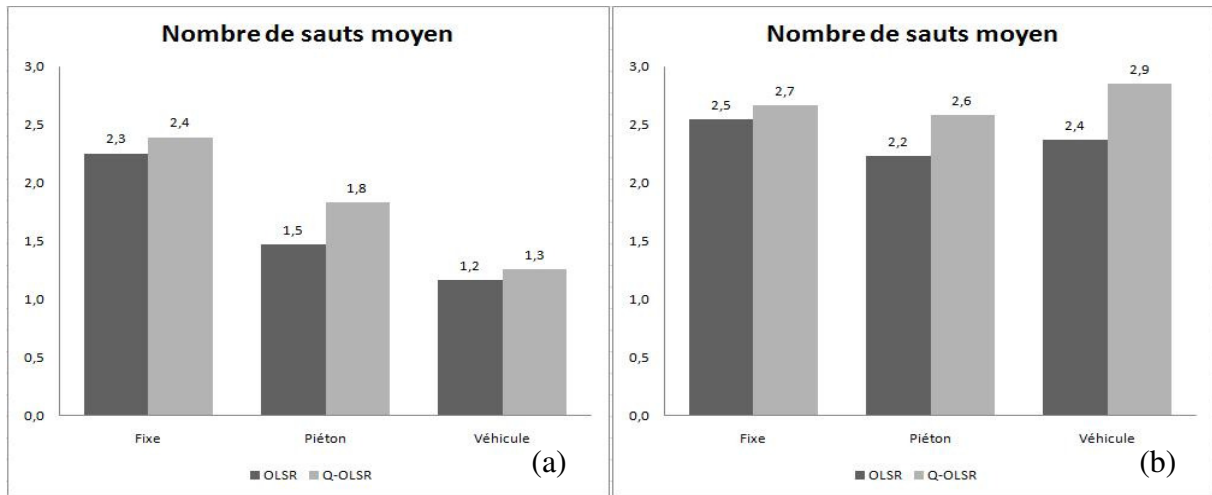


Figure 5.33 Nombre de sauts moyen pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

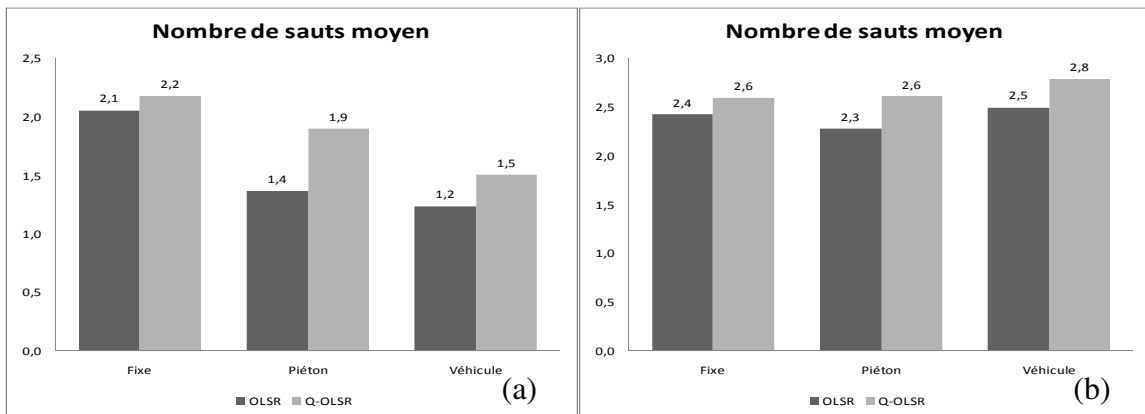


Figure 5.34 Nombre de sauts moyen pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

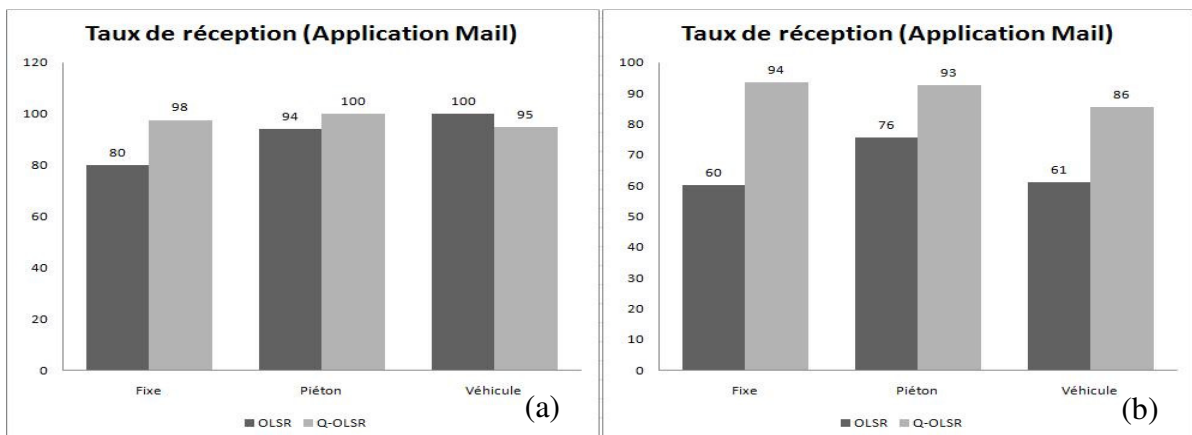


Figure 5.35 Taux de réception des mails pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

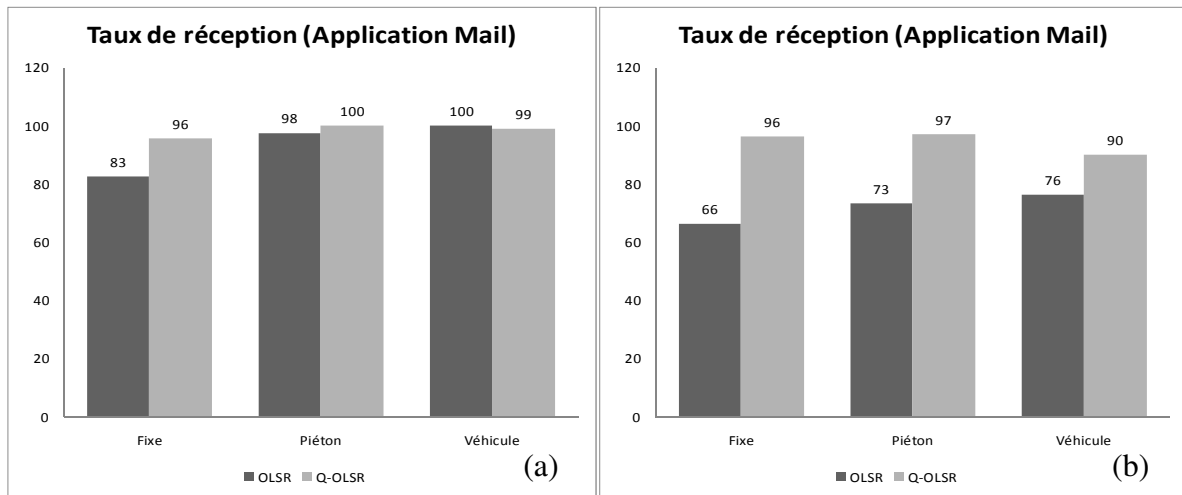


Figure 5.36 Taux de réception des mails pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Les figures 5.35 et 5.36 décrivent les taux de réception observés pour l'application mail respectivement dans les MANET formés de 50 et 100 noeuds. Le protocole Q-OLSR obtient globalement des performances équivalentes à OLSR natif en milieu ouvert, mais il apporte une amélioration sur le taux de réception pouvant aller jusqu'à 30% en milieu urbain. Contrairement au constat fait sur le délai dans le WLAN, les délais observés dans le cadre de l'application mail sont majoritairement, dans 18 cas sur 24, plus intéressants avec Q-OLSR qu'avec OLSR natif qu'il s'agisse du téléchargement des mails (figures 5.37 et 5.38) ou de leur transmission vers le serveur (figures 5.39 et 5.40).

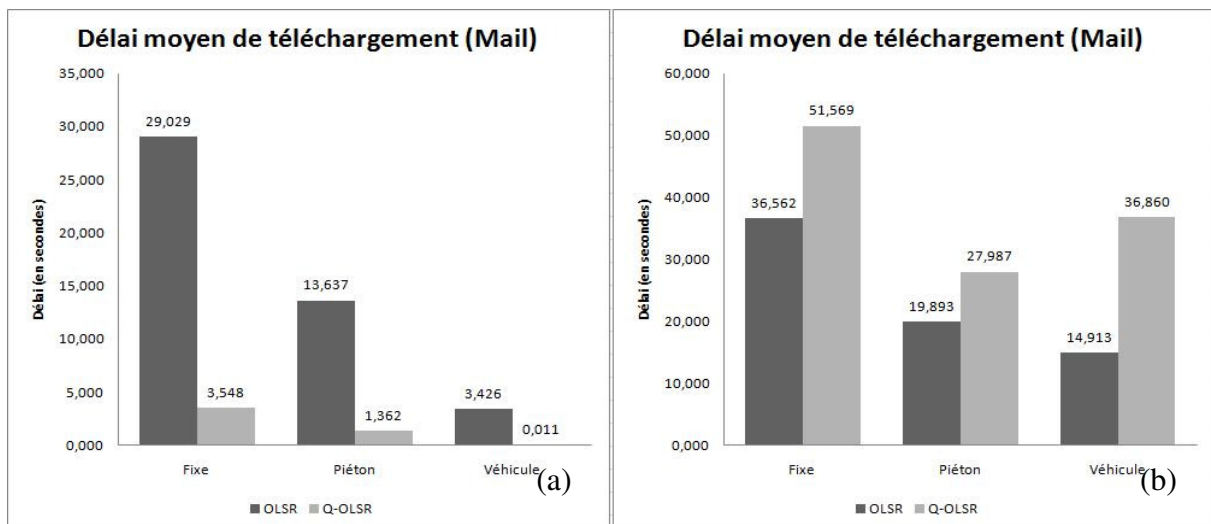


Figure 5.37 Délai moyen de téléchargement de mails du serveur pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

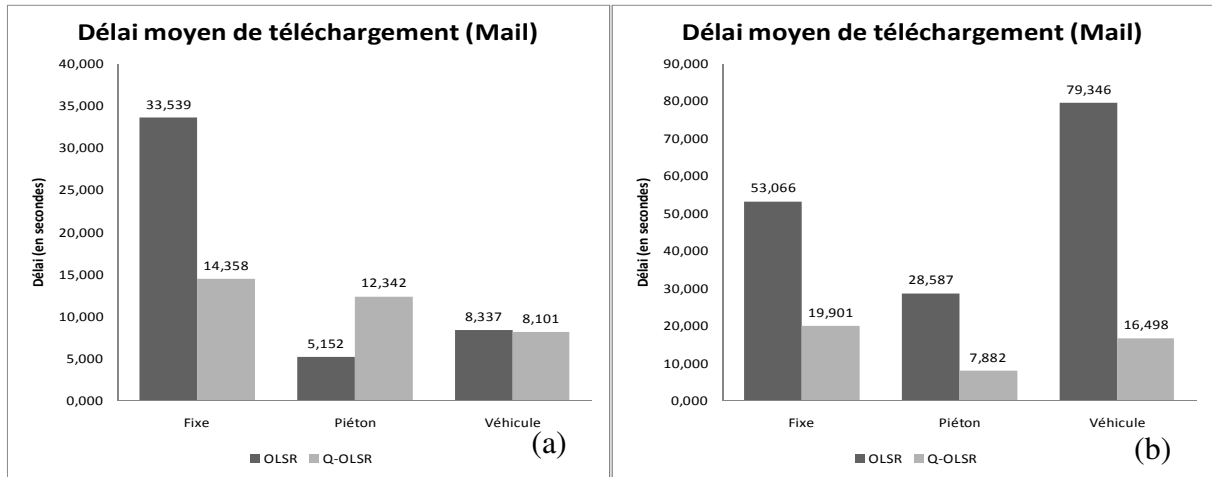


Figure 5.38 Délai moyen de téléchargement de mails du serveur pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

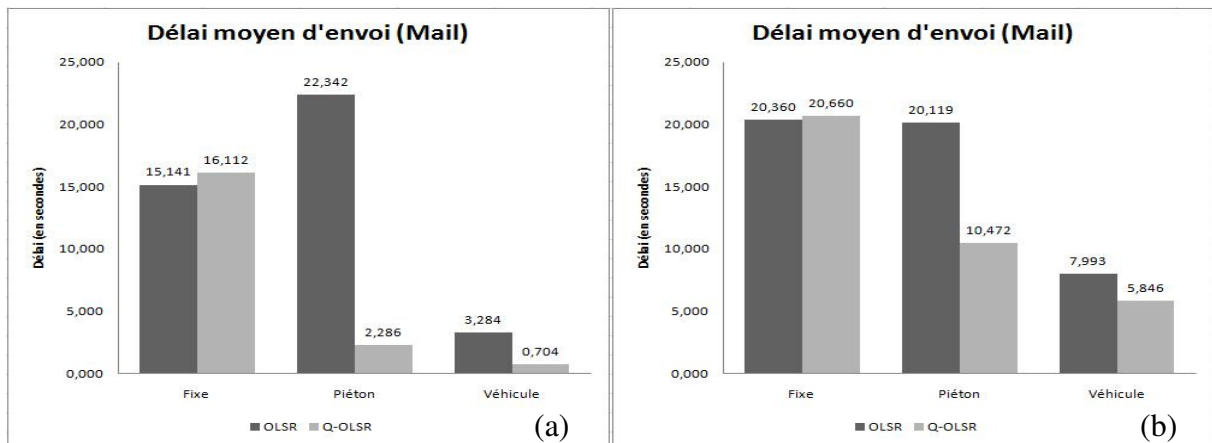


Figure 5.39 Délai moyen d'envoi de mails vers le serveur pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

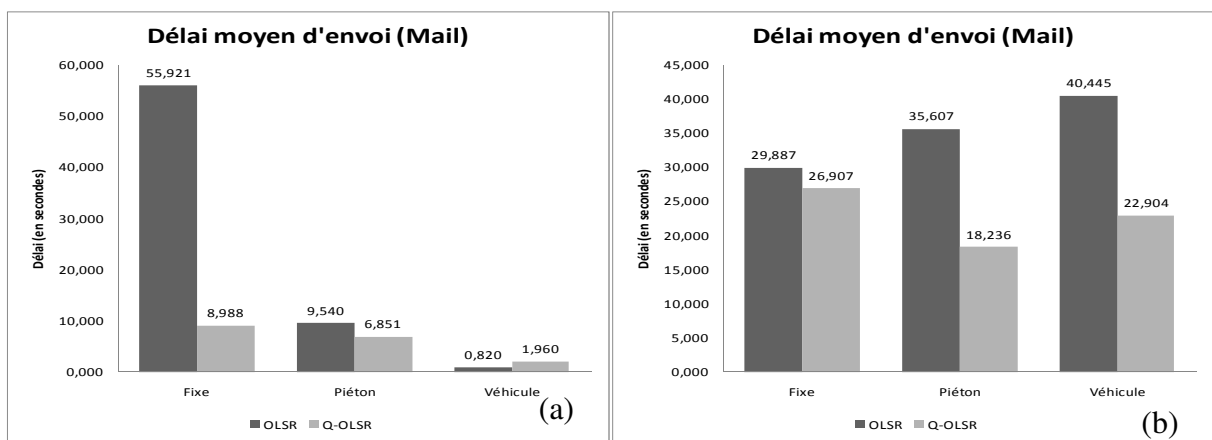


Figure 5.40 Délai moyen d'envoi de mails vers le serveur pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Le délai de téléchargement inclut le temps d'envoi de la requête vers le serveur, le temps de traitement et la réception effective de toutes les données. Le temps d'envoi inclut le temps de transmission des données vers le serveur et le temps d'attente jusqu'à la réception de l'accusé de réception envoyé par le serveur.

Des résultats analogues à ceux observés avec l'application mail sont obtenus pour le transfert de fichiers. Les améliorations apportées par Q-OLSR peuvent atteindre jusqu'à 30%. Elles sont particulièrement significatives dans les scénarios en milieu urbain ou lorsque les nœuds sont fixes indépendamment de l'environnement. Les figures 5.41 et 5.42 décrivent ces résultats respectivement pour 50 et 100 nœuds.

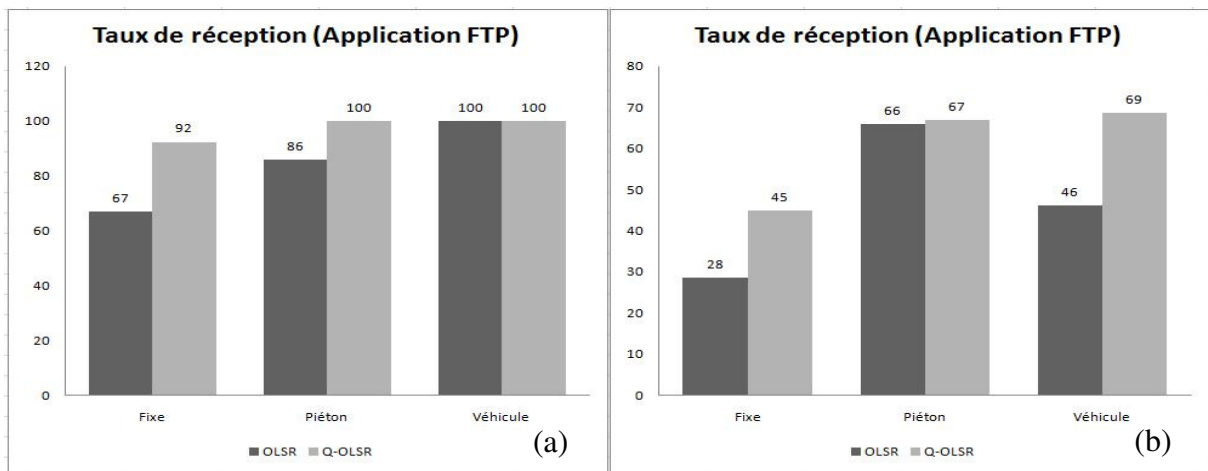


Figure 5.41 Taux de réception de fichiers par FTP pour 50 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

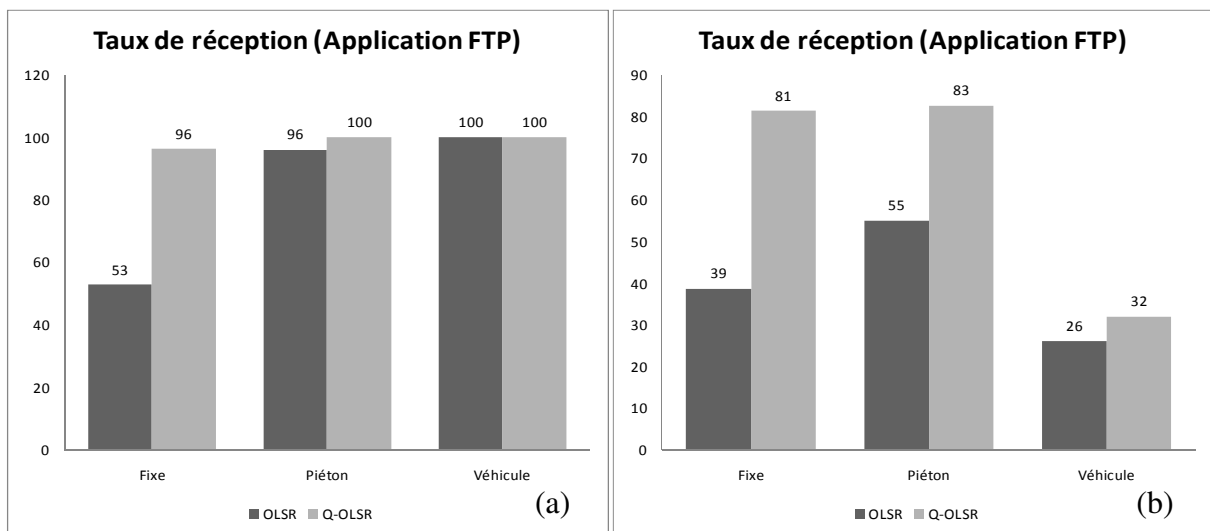


Figure 5.42 Taux de réception de fichiers par FTP pour 100 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Les délais de téléchargement (figures 5.43 et 5.44) et d'envoi de fichiers (figures 5.45 et 5.46) vers le serveur sont plutôt globalement meilleurs, 16 cas sur 24, avec OLSR natif.

Néanmoins, ce dernier obtient systématiquement des résultats moins bons lorsque les nœuds sont fixes. En effet, dans ces scénarios la source et la destination restent à la même distance l'une de l'autre, et il revient au protocole de routage de trouver les meilleures routes pour acheminer le trafic entre les deux. Systématiquement dans toutes les évaluations présentées, Q-OLSR y obtient de meilleurs résultats qu'OLSR natif. En revanche, en milieu urbain on observe que Q-OLSR propose plus souvent un délai plus long pour le téléchargement et le transfert de fichiers.

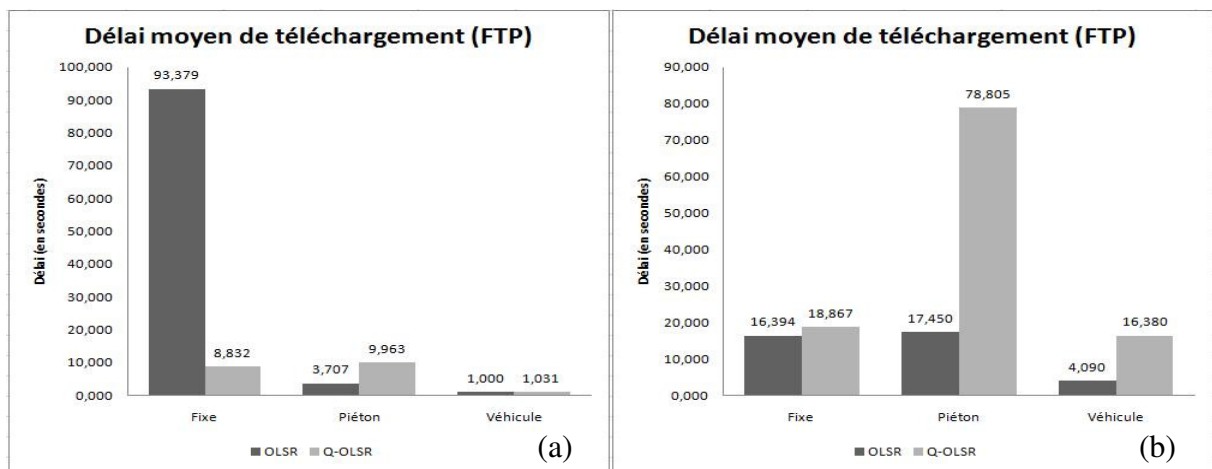


Figure 5.43 Délai moyen de téléchargement de fichiers du serveur pour 50 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

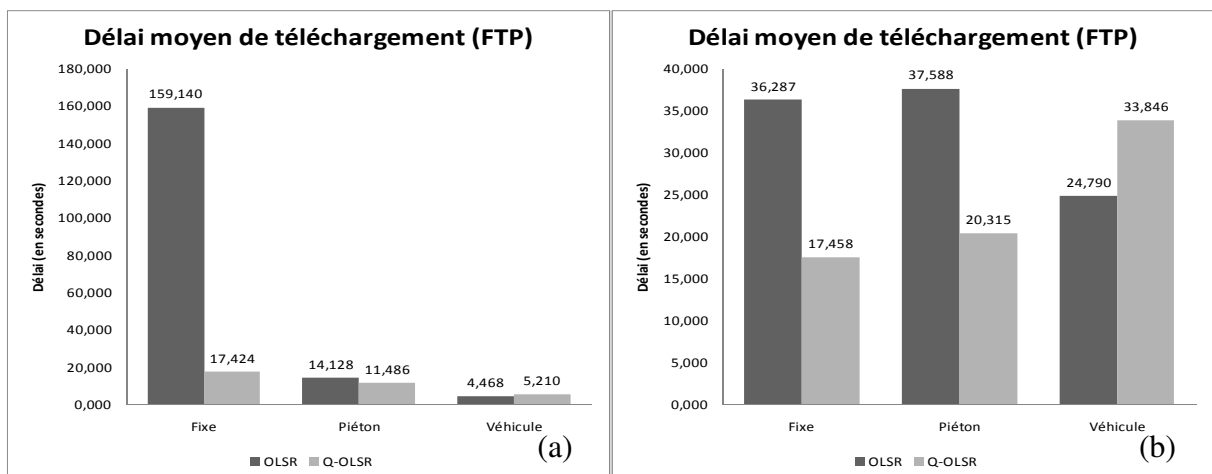


Figure 5.44 Délai moyen de téléchargement de fichiers du serveur pour 100 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

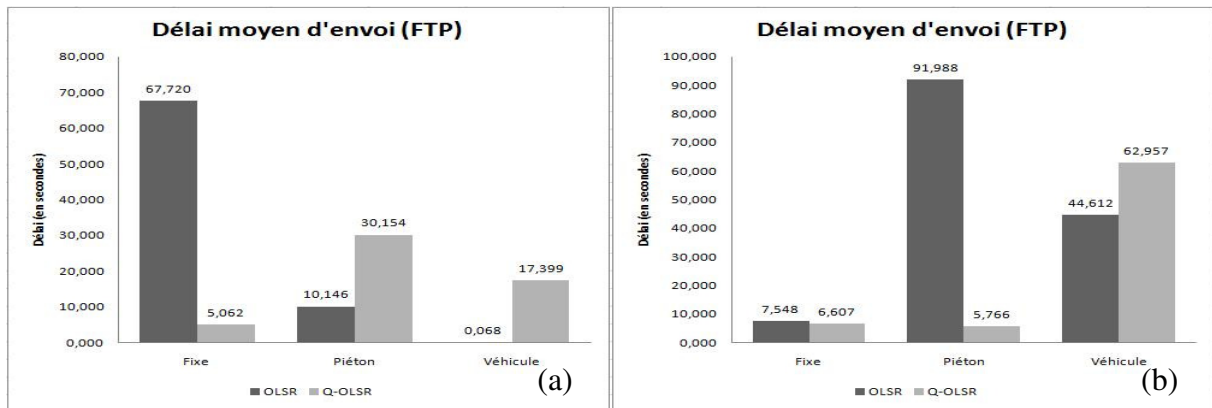


Figure 5.45 Délai moyen d'envoi de fichiers du serveur pour 50 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

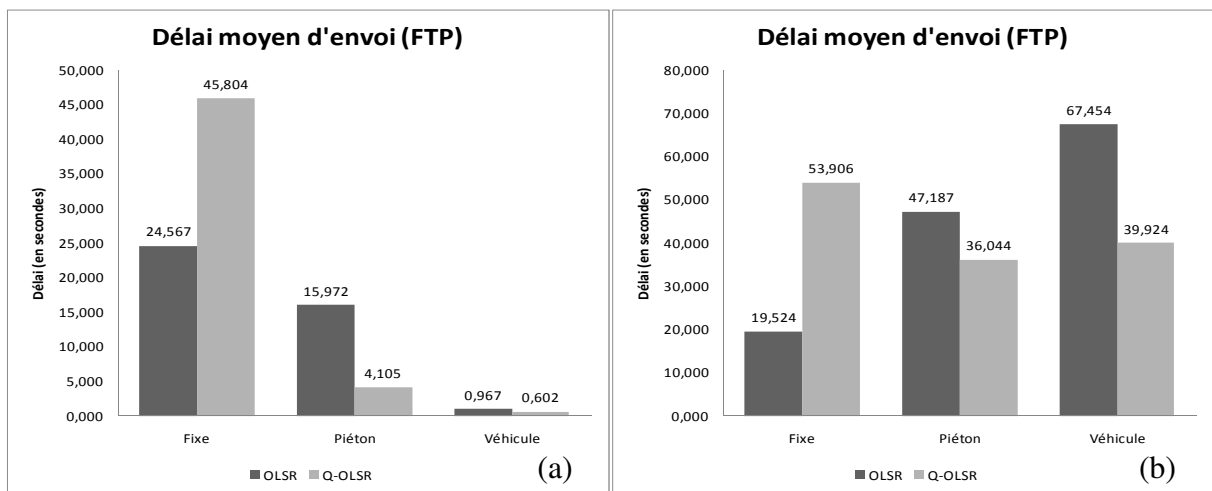


Figure 5.46 Délai moyen d'envoi de fichiers du serveur pour 100 nœuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Les résultats présentés dans cette section établissent que Q-OLSR permet d'améliorer les taux de réception pour le trafic issu d'applications fonctionnant en mode best-effort. Les délais observés sont du même ordre que ceux obtenus avec le protocole OLSR natif.

Performances pour la vidéoconférence

Cette section présente les résultats obtenus lors des évaluations sur l'application vidéoconférence. Le nombre de sauts moyen observé avec OLSR natif et Q-OLSR, respectivement dans les MANET à 50 (figure 5.47) et 100 nœuds (figure 5.48) montre que Q-OLSR propose des routes légèrement moins longues en milieu ouvert, mais beaucoup plus longues en milieu urbain.

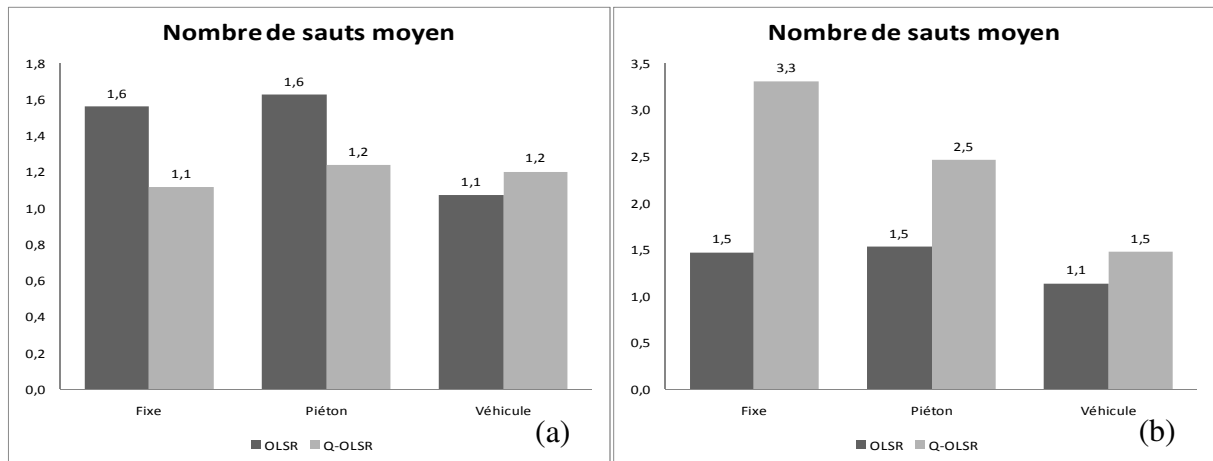


Figure 5.47 Nombre de sauts moyen pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

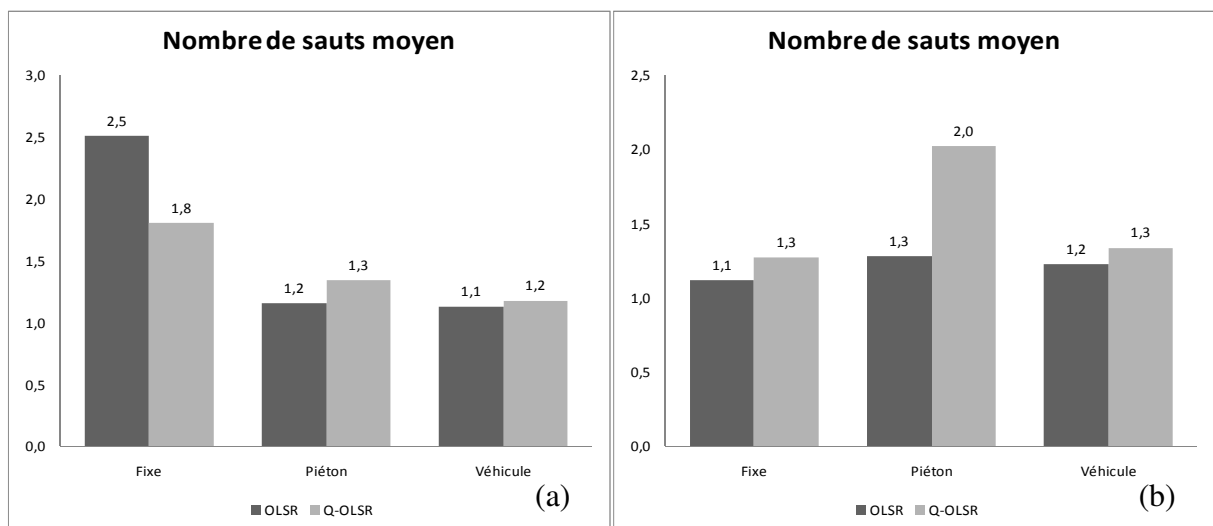


Figure 5.48 Nombre de sauts moyen pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Les figures 5.49 et 5.50 décrivent les taux de réception observés pour l'application vidéoconférence respectivement dans les MANET formés de 50 et 100 noeuds. Les performances obtenues par les deux protocoles sont très corrélées avec le nombre de sauts moyen des routes qu'ils génèrent. Le taux de réception est bon lorsque le nombre de sauts avoisine 1 saut, et il se dégrade au-delà. On observe néanmoins que cette dégradation est davantage élevée pour de faibles hausses du nombre de sauts avec OLSR natif, comparativement à Q-OLSR. Dans tous les cas, le taux de perte observé est trop élevé par rapport aux exigences de la vidéoconférence dont le déploiement dans les MANET est à envisager avec des résolutions plus faibles, supportant un taux de perte plus élevé.

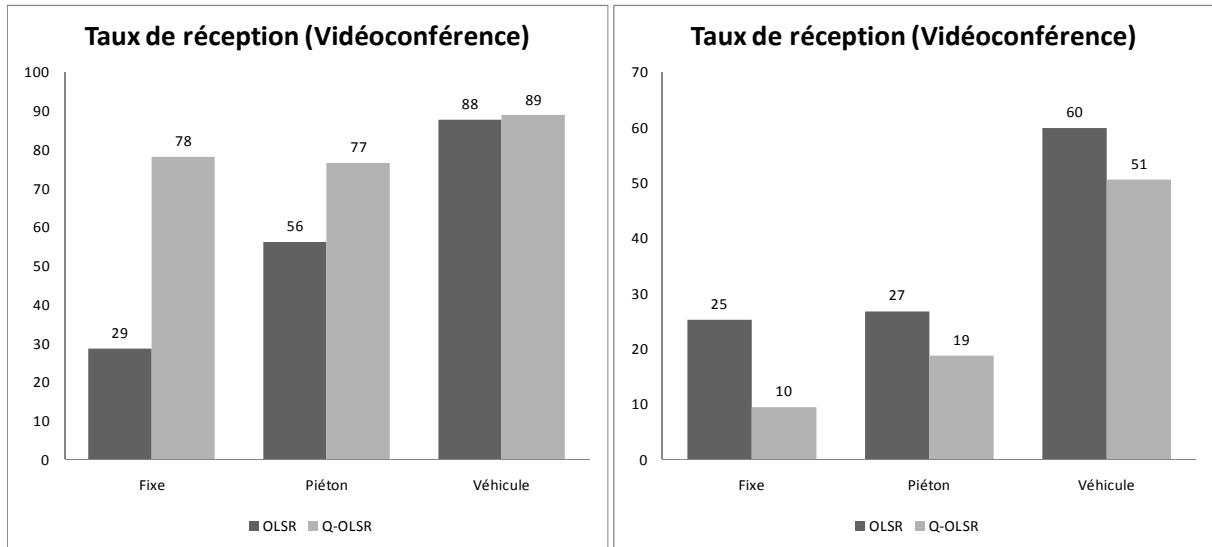


Figure 5.49 Réception pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

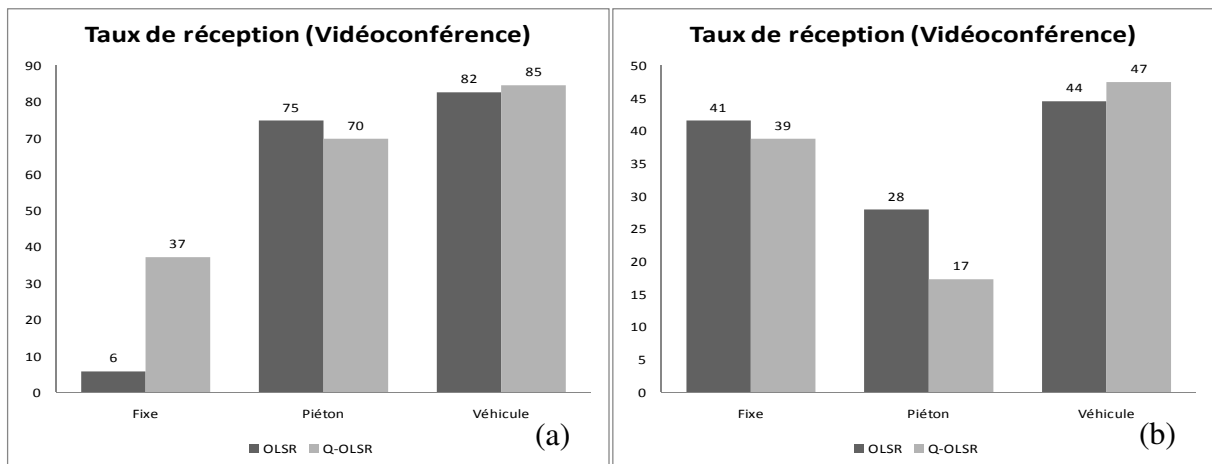


Figure 5.50 Réception pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

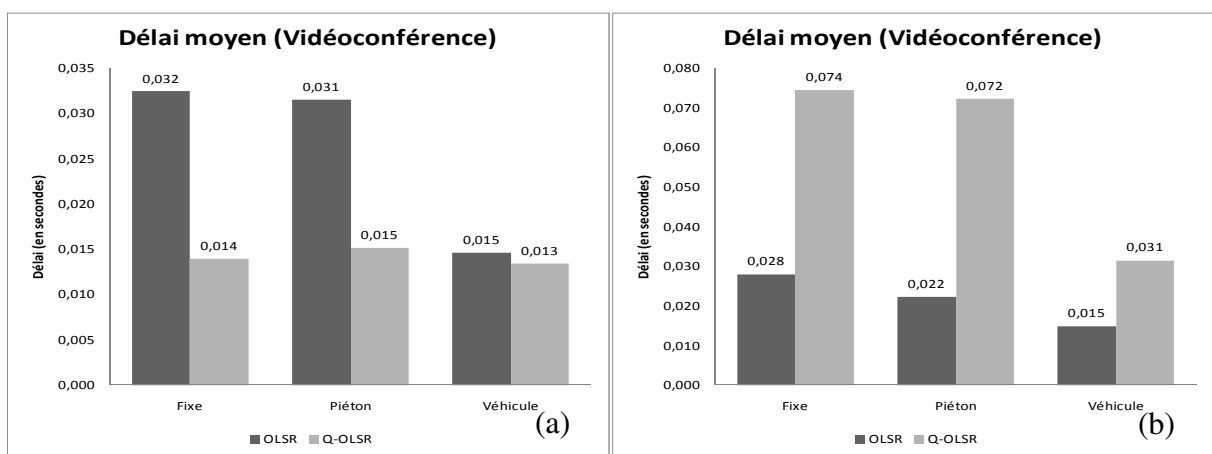


Figure 5.51 Délai moyen pour la vidéoconférence pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

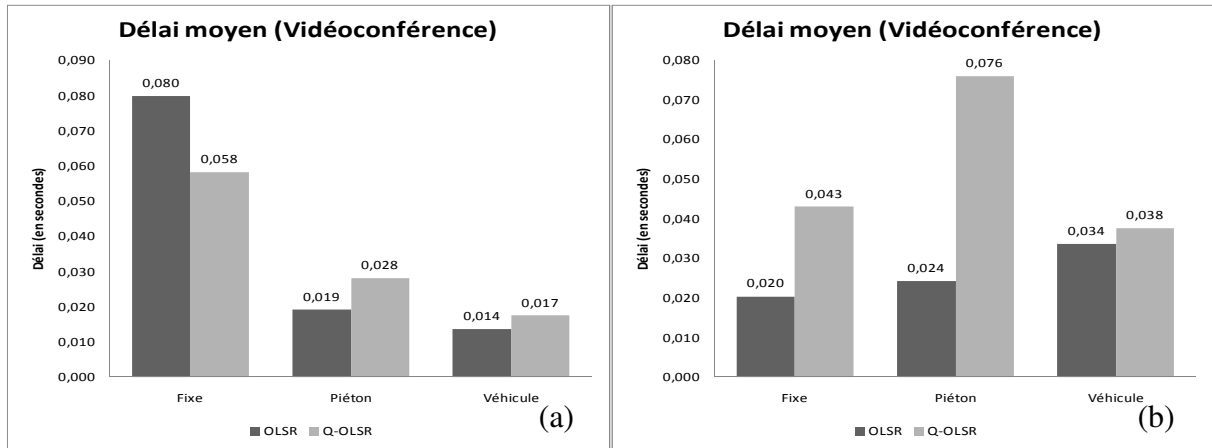


Figure 5.52 Délai moyen pour la vidéoconférence pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

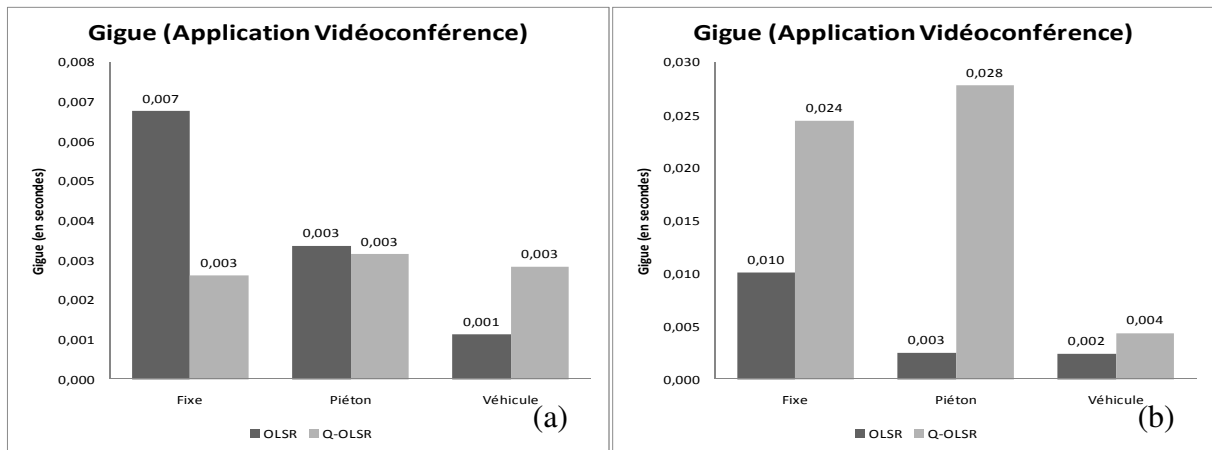


Figure 5.53 Gigue moyenne pour la vidéoconférence pour 50 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

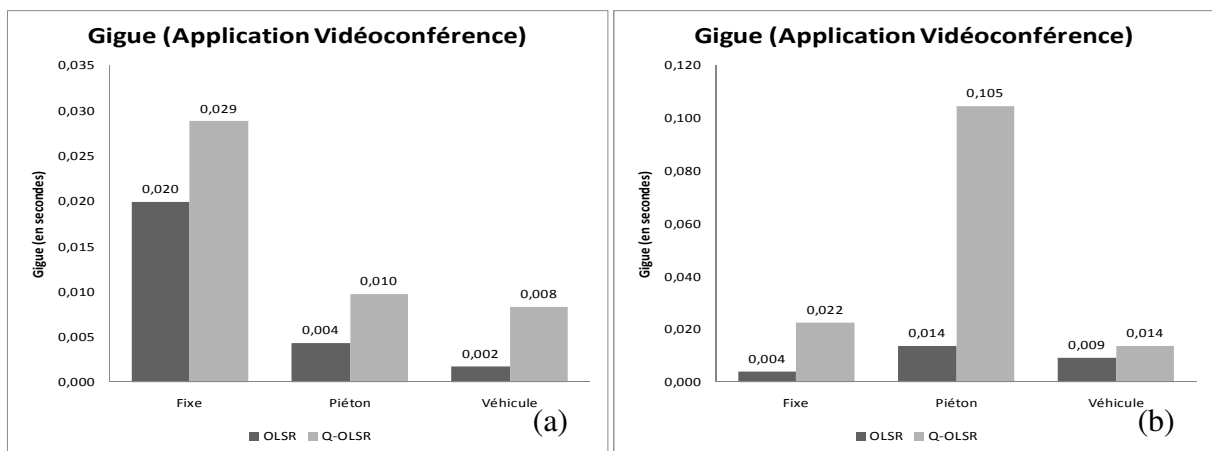


Figure 5.54 Gigue moyenne pour la vidéoconférence pour 100 noeuds en milieu a) ouvert et b) urbain

Les délais moyens ainsi que les giges moyennes observés sont également corrélées avec le nombre de sauts. Contrairement au taux de réception, le délai reste inférieur au seuil de 150 ms (figures 5.51 et 5.52) requis pour la vidéoconférence, mais la gigue atteint parfois des valeurs supérieures à 50 ms aussi bien avec OLSR qu’avec Q-OLSR (figures 5.53 et 5.54). Ces premières évaluations sont obtenues en autorisant simultanément 4 sessions de vidéoconférence dans les réseaux de 50 nœuds et 5 sessions dans les réseaux à 100 nœuds.

Nous avons mené des évaluations supplémentaires en réduisant le trafic à 3 sessions quel que soit le nombre de nœuds. Les paires communicantes dans le cadre de ces sessions sont choisies et leurs trajectoires définies de manière à ce que la distance les séparant permette des communications, respectivement à 1, 2 et 3 sauts. Le but est d’observer si le fait de baisser le nombre de sessions vidéoconférence permet d’améliorer les performances et de pouvoir comparer OLSR et Q-OLSR sur la base du même nombre de sauts. Les résultats les moins bons étant obtenus en milieu urbain, ces secondes évaluations sont faites en milieu urbain.

Le nombre de sauts moyen ainsi que les taux de réception observés avec OLSR natif et Q-OLSR, respectivement dans les MANET à 50 (figure 5.55) et 100 nœuds (figure 5.56) confirment que les 3 sessions vidéoconférence se déroulent bien lorsque la source et la destination sont à un saut l’une de l’autre. On perçoit un début de dégradation dans les MANET à 100 noeuds. Les giges ainsi que les délais observés (figures 5.57 et 5.58) respectent également les contraintes de qualité de service spécifiées pour la vidéoconférence. Naturellement, lorsque les communications se déroulent à un saut, le rôle du protocole de routage est négligeable. On observe néanmoins que le trafic de routage additionnel généré par Q-OLSR affecte davantage les communications, comparativement à OLSR natif.

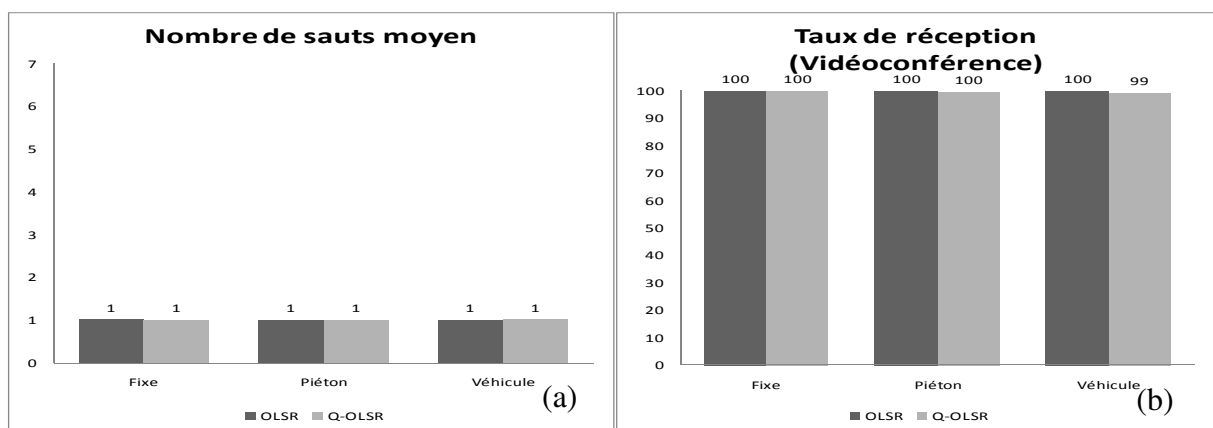


Figure 5.55 Nombre de sauts moyen et taux de réception pour la vidéoconférence avec 50 noeuds en milieu urbain (1 saut)

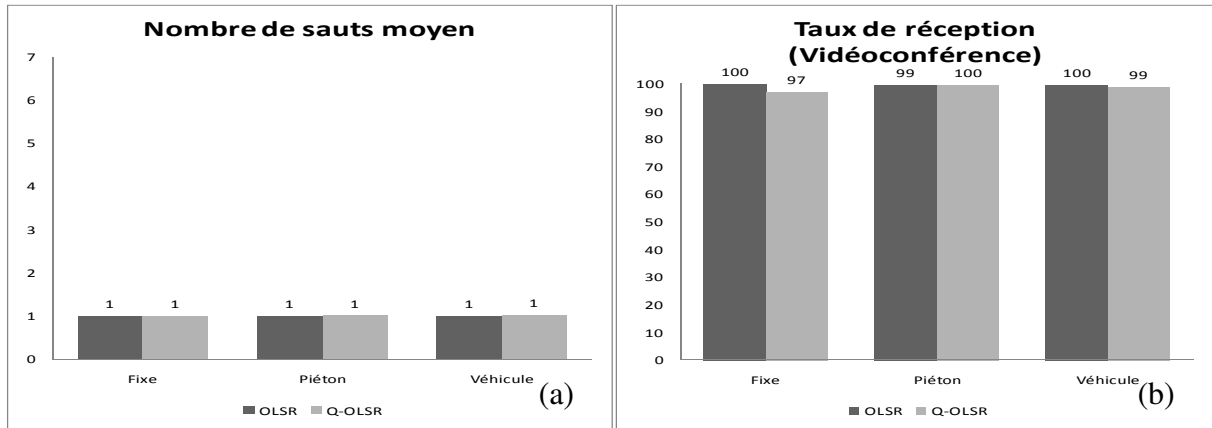


Figure 5.56 Nombre de sauts moyen et taux de réception pour la vidéoconférence avec 100 noeuds en milieu urbain (1 saut)

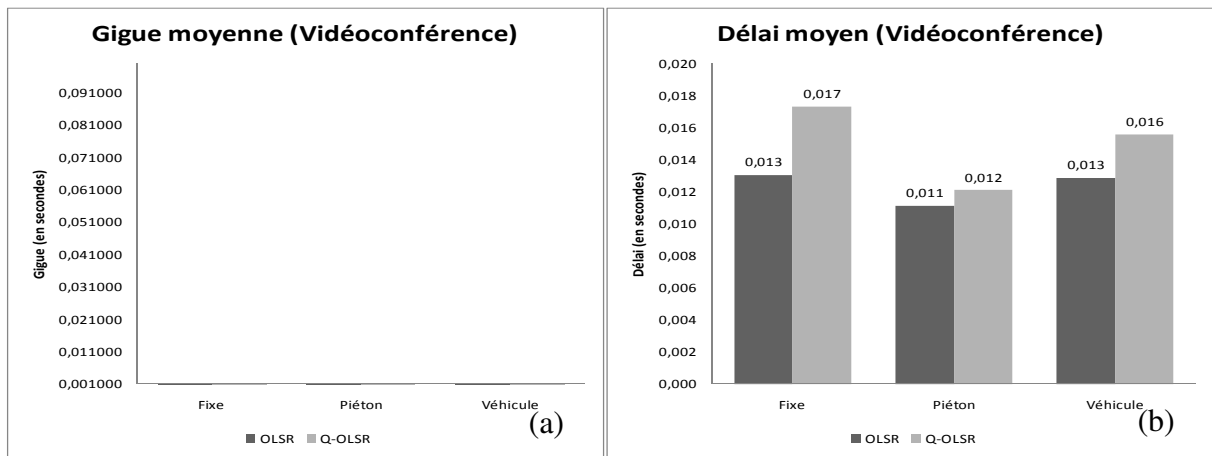


Figure 5.57 Gigue et délai pour la vidéoconférence avec 50 noeuds en milieu urbain (1 saut)

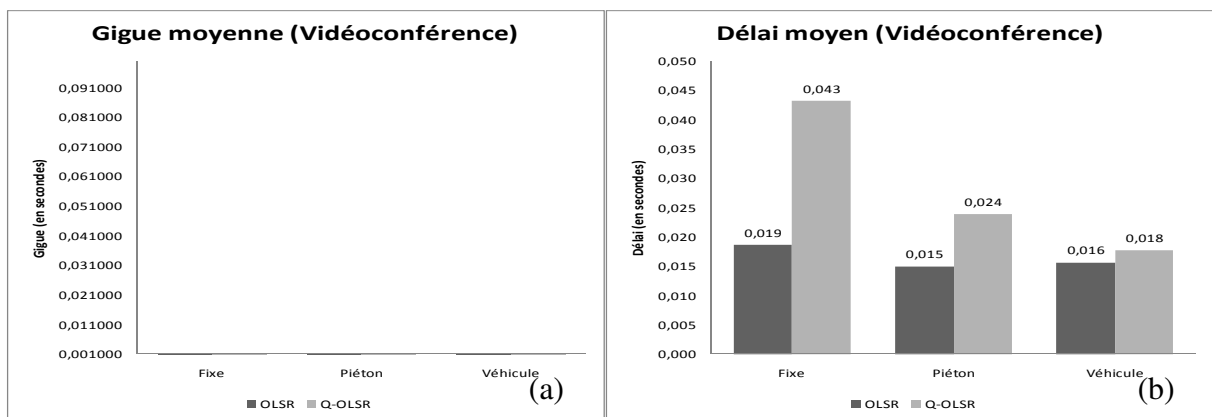


Figure 5.58 Gigue et délai pour la vidéoconférence avec 100 noeuds en milieu urbain (1 saut)

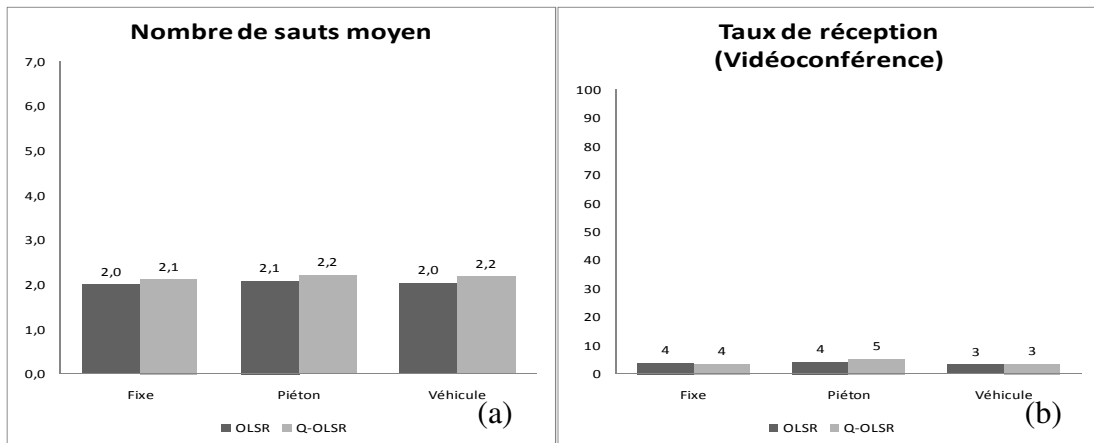


Figure 5.59 Nombre de sauts moyen et taux de réception pour la vidéoconférence avec 50 nœuds en milieu urbain (2 sauts)

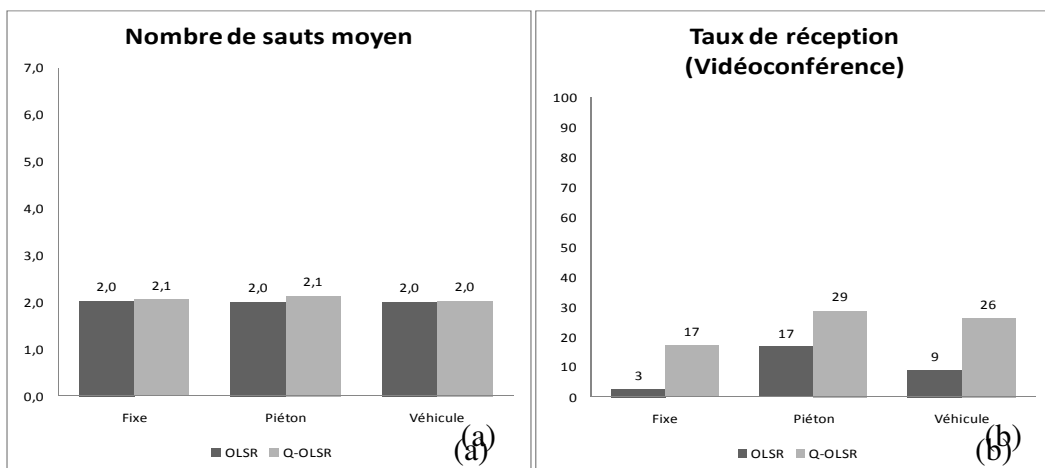


Figure 5.60 Nombre de sauts moyen et taux de réception pour la vidéoconférence avec 100 nœuds en milieu urbain (2 sauts)

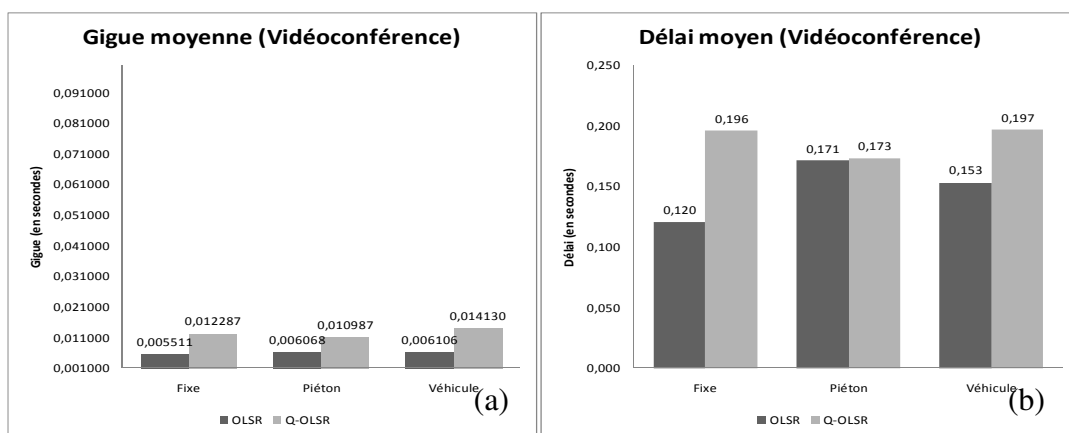


Figure 5.61 Gigue et délai pour la vidéoconférence avec 50 nœuds en milieu urbain (2 sauts)

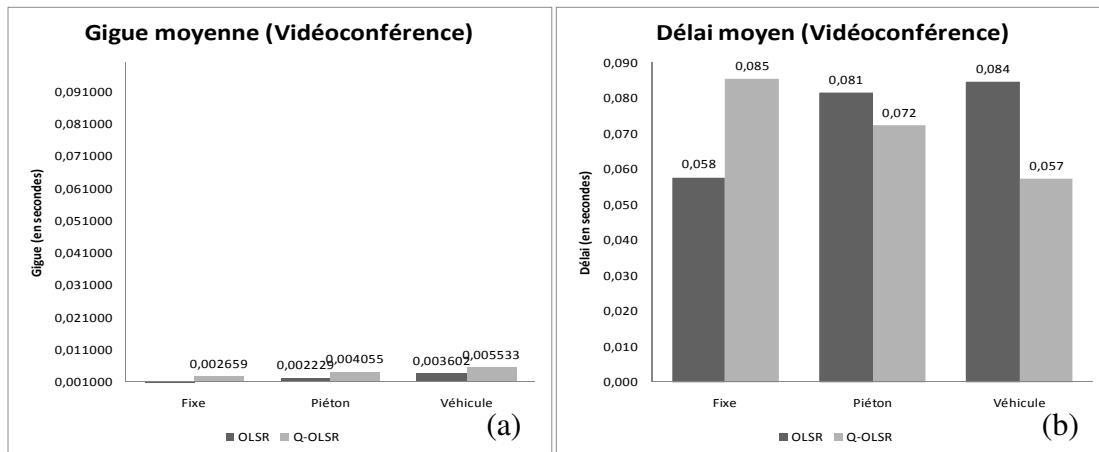


Figure 5.62 Gigue et délai pour la vidéoconférence avec 100 nœuds en milieu urbain (2 sauts)

Les taux de réception observés avec OLSR natif et Q-OLSR, respectivement dans les MANET à 50 (figure 5.59) et 100 nœuds (figure 5.60) pour les 3 sessions vidéoconférence sont très faibles lorsque la destination est à deux sauts de la source. Dans les réseaux comportant 100 nœuds, la proximité relative des nœuds et le débit qui en résulte permet d'obtenir des résultats légèrement meilleurs. Bien que les taux de réception soient insuffisants avec les deux protocoles, Q-OLSR achemine plus de trafic qu'OLSR natif. Les giges observées respectent les contraintes pour la vidéoconférence, mais les délais sont trop longs dans les scénarios comportant 50 nœuds (figures 5.61 et 5.62).

Les résultats à 3 sauts sont similaires à ceux obtenus à deux sauts (figures 5.63, 5.64, 5.65 et 5.66). On note en particulier que Q-OLSR propose fréquemment des routes ayant 4 sauts et en obtient de meilleurs résultats qu'OLSR natif avec 3 sauts.

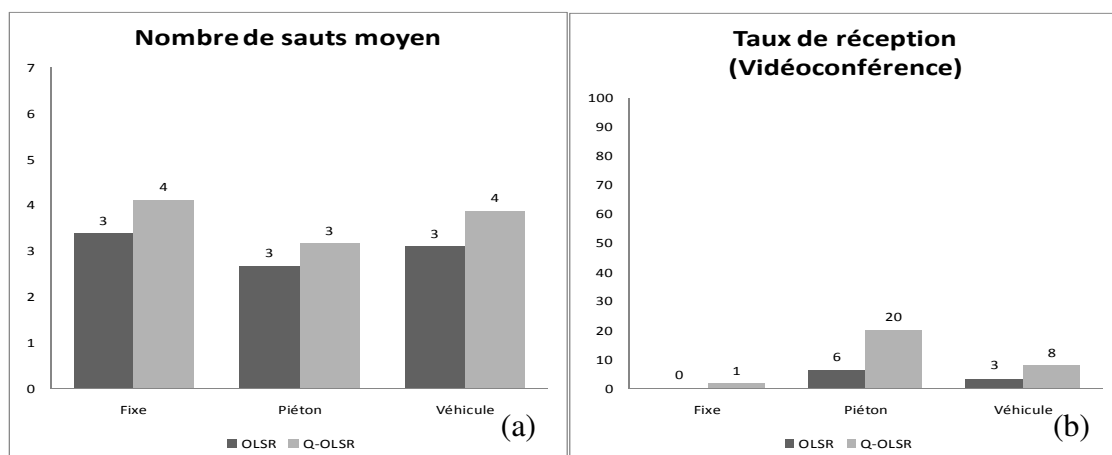


Figure 5.63 Nombre de sauts moyen et taux de réception pour la vidéoconférence avec 50 nœuds en milieu urbain (3 sauts)

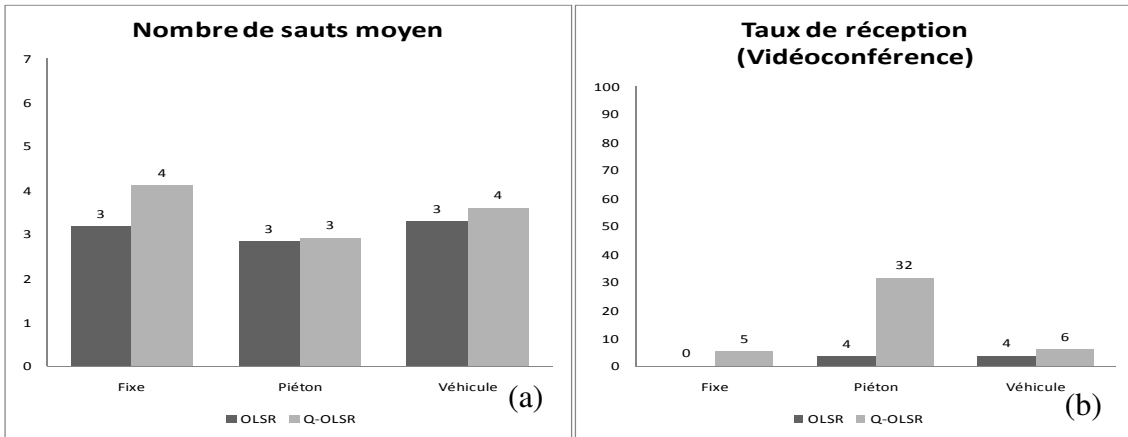


Figure 5.64 Nombre de sauts moyen et taux de réception pour la vidéoconférence avec 100 noeuds en milieu urbain (3 sauts)

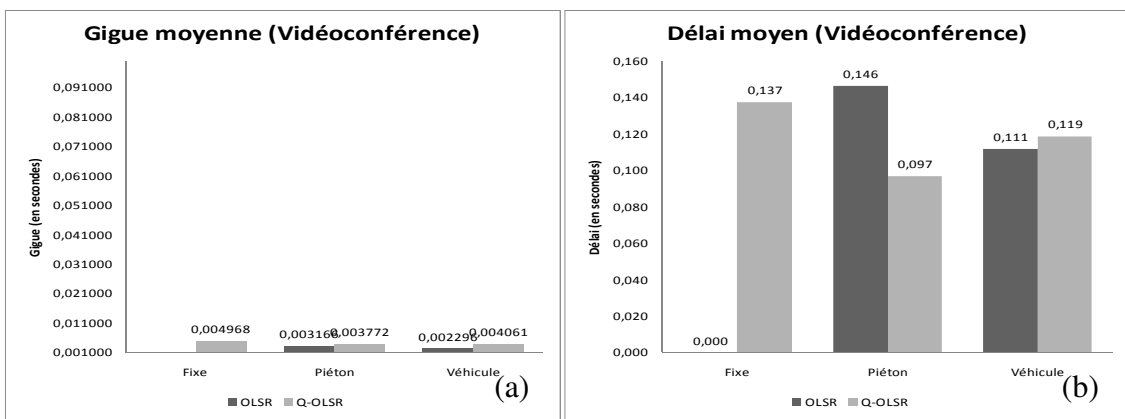


Figure 5.65 Gigue et délai pour la vidéoconférence avec 50 noeuds en milieu urbain (3 sauts)

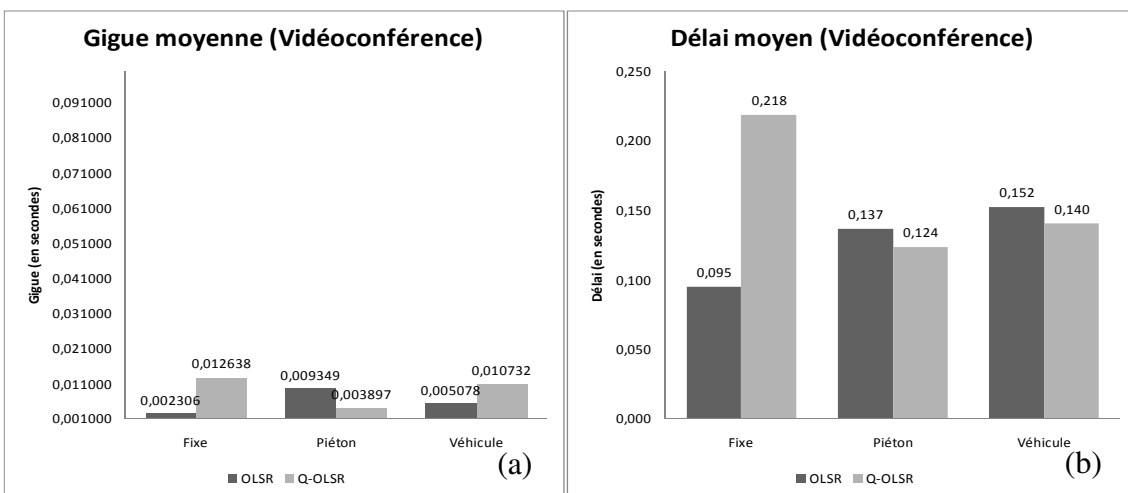


Figure 5.66 Gigue et délai pour la vidéoconférence avec 100 noeuds en milieu urbain (3 sauts)

Les résultats de ces secondes évaluations établissent qu'en réduisant le nombre de sessions vidéoconférences simultanées à 3, on obtient une qualité parfaite à condition que la source et la destination communiquent sur un lien direct. Le passage à deux ou 3 sauts dégrade fortement le taux de réception des paquets associés aux sessions vidéoconférences. Les valeurs très faibles associées à la gigue suggèrent que le flux de paquets qui arrive à destination est quasiment continu. Les délais élevés par rapport au faible nombre de sauts suggèrent que les paquets passent un temps relativement long dans les files d'attente de retransmission. La plupart d'entre eux atteignent le seuil du nombre de retransmissions et sont finalement supprimés, entraînant une chute du taux de réception. Cette situation peut être associée d'une part à un faible débit dû à la présence simultanée des flux des 3 sessions, et d'autre part aux interférences qui font que le flux de transmission continu entre la source et le premier retransmetteur empêche ce dernier de retransmettre régulièrement les paquets reçus.

Afin de vérifier ces hypothèses et voir dans quelle mesure elles ont pu influencer sur les résultats présentés, nous avons mené une troisième série d'évaluations. Le contexte choisi est un milieu ouvert contenant 100 nœuds fixes tels que décrits sur la figure 5.67.

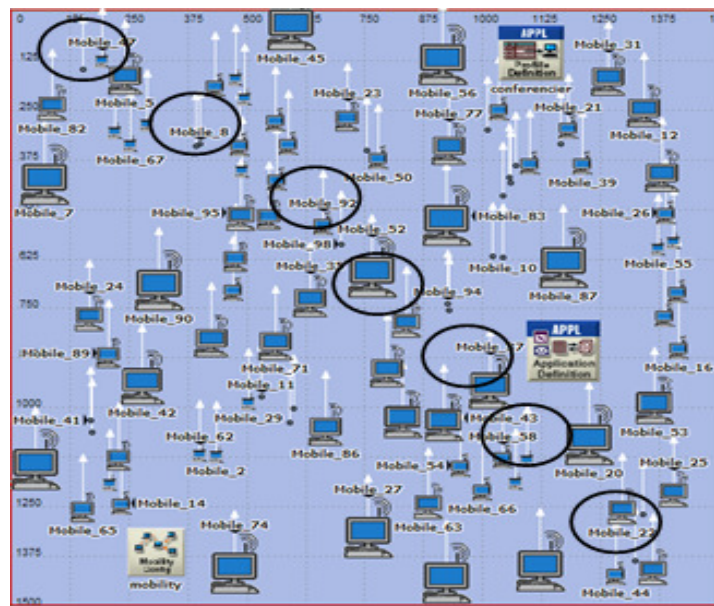


Figure 5.67 Scénario pour la troisième série d'évaluations

Le nœud 47 au coin supérieur gauche est choisi en tant que source. Une seule session de vidéoconférence est autorisée à chaque simulation. Une série de 7 simulations est réalisée. Une destination est choisie à chaque fois à une distance telle que l'on obtienne respectivement environ de 1 à 7 sauts. Ces scénarios nous permettent d'évaluer les performances obtenues en l'absence de flux de vidéoconférence concurrent, et de constater l'impact des interférences

causées par le flux en amont d'un retransmetteur sur le flux en aval. Le tableau 5.4 présente une synthèse des résultats obtenus.

Tableau 5.4 Taux de réception et délais observés de 1 à 7 sauts

| Nombre de sauts | OLSR natif | | Q-OLSR | |
|-----------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| | Délai (ms) | Taux de reception (%) | Délai (ms) | Taux de reception (%) |
| 1 | 12 | 100 | 13 | 100 |
| 2 | 30 | 11 | 30 | 60 |
| 3 | 100 | 11 | 80 | 20 |
| 4 | 100 | 5 | 60 | 31 |
| 5 | 180 | 1 | 100 | 13 |
| 6 | 200 | 0.7 | 150 | 13 |
| 7 | - | 0 | 250 | 0.5 |

On observe d'emblée que le taux de réception à 1 saut est de 100% pour les deux protocoles de routage comme déjà établi dans la seconde série d'évaluations. En l'absence de flux de vidéoconférence concurrent, le délai de bout en bout reste inférieur au seuil requis jusqu'à 6 sauts pour Q-OLSR et seulement jusqu'à 4 sauts pour OLSR natif. Ce dernier assure un taux de réception inférieur à 11% lorsque la destination est à 2 sauts alors que, pour le même nombre de sauts, Q-OLSR assure un taux de réception de 60%. Ce dernier conserve jusqu'à 6 sauts un taux de 13%, ce qui est supérieur à celui obtenu par OLSR natif à deux sauts. Ceci prouve sa capacité à calculer de meilleures routes qu'OLSR natif pour acheminer le trafic.

Néanmoins, sur 100 paquets qui parviennent au nœud intermédiaire, seulement 60 atteignent la destination. Etant donné qu'il n'y a qu'une source, une destination et un flux en présence, le débit qui y est consacré est très proche de celui qui serait mobilisé par un mécanisme de réservation spécifique. Ces résultats montrent donc qu'en plus de la réservation de ressources, il est nécessaire que la source interrompe de temps en temps ses transmissions pour permettre au nœud intermédiaire d'assurer les retransmissions. Cela doit néanmoins se faire en veillant à ce que le délai de bout en bout et la gigue demeurent inférieurs aux seuils.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, 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 pouvant atteindre jusqu'à 50% du trafic généré par OLSR natif. Malgré ce trafic additionnel et le fait qu'il augmente le délai observé dans le WLAN, il permet d'améliorer le débit disponible. 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. Des résultats ayant fait l'objet de publications montrent qu'il peut également supporter l'acheminement de la voix et des images mieux qu'OLSR natif, tout en garantissant une qualité satisfaisante pour la voix. En revanche, les évaluations présentées dans ce mémoire établissent qu'une performance satisfaisante pour la vidéoconférence est possible même en présence de trois flux concurrents, mais uniquement lorsque la source et la destination sont situées à un saut l'une de l'autre. 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 nettement meilleurs que ceux obtenus avec OLSR natif. Nous rappelons que ces résultats sont obtenus uniquement grâce à des mécanismes mis en œuvre au niveau du routage. En effet, contrairement aux approches cross-layer, la satisfaction des exigences de la QoS dans notre approche ne recourt pas aux mécanismes mis en œuvre au niveau des autres couches tels que le call admission control ou la réservation de ressources. De plus, aucune modification n'a été apportée à la couche MAC.

Nous avons également mis en lumière le besoin d'un mécanisme supplémentaire pour la prise en charge de la vidéoconférence dans les MANET. En effet, en plus de la réservation de ressources, il est nécessaire que la source interrompe de temps en temps ses transmissions pour permettre au nœud intermédiaire d'assurer les retransmissions.

6

Conclusion et perspectives

- 6.1 *Conclusion*
- 6.2 *Perspectives*

6 Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au routage avec qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc. Malgré le grand nombre de travaux proposés sur le sujet depuis une dizaine d'années, aucun protocole de routage avec qualité de service pour les réseaux mobiles ad hoc n'a été standardisé à ce jour et les protocoles de routage best-effort restent les plus utilisés dans la plupart des applications.

Contrairement à l'approche adoptée à l'origine de la conception des protocoles de routage pour les réseaux mobiles qui envisage la qualité de service comme une extension, nous partageons l'idée selon laquelle la généralisation des applications multimédia impose que les mécanismes en charge de la qualité de service soient des composantes de base du protocole de routage.

Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé un cadre pour la représentation des réseaux mobiles ad hoc prenant en compte les paramètres de la qualité de service. Le réseau est représenté sous la forme d'un graphe multivalué où les poids représentent les métriques considérées, y compris celles de la qualité de service. Le cadre propose un ensemble de concepts qui doivent être spécifiés dans toute étude dédiée à la conception de mécanismes pour garantir la qualité de service dans les MANET. Cette pratique permet de garantir que les solutions proposées seront claires, génériques et par conséquent faciles à comparer avec d'autres travaux.

Dans un premier temps, nous avons appliqué ces concepts à la modélisation du problème de l'optimisation des ressources dans les réseaux mobiles ad hoc dans l'optique de permettre également la satisfaction des contraintes de qualité de service. Nous avons montré que dans la plupart des travaux, les mécanismes pour la qualité de service sont proposés en plus des mécanismes existant pour optimiser l'utilisation des ressources. Nous sommes convaincus que cette approche est en partie due au fait que la qualité de service est envisagée comme une extension. Nous avons considéré le cas du protocole OLSR où l'optimisation de l'utilisation des ressources repose en grande partie sur l'optimisation de la diffusion et une utilisation efficace de l'énergie avec les relais multipoints (MPR). Nous avons montré que l'approche duale évoquée ci-dessus conduit à traiter deux problèmes NP-dur : d'une part, celui de la

sélection des relais multipoints pour l'optimisation de la diffusion, et d'autre part celui de la sélection des relais multipoints en fonction des paramètres de la qualité de service. Dans certains travaux, cela aboutit à la sélection de plusieurs ensembles de MPR. Cette démarche pourrait avoir un impact négatif du fait qu'elle pourrait entraîner une consommation plus importante de la puissance de calcul et de l'énergie lors de la sélection des MPR. De plus, le trafic supplémentaire généré par ces différents ensembles de MPR pourrait entraîner une consommation de la bande passante au détriment du trafic des applications.

Les deux problèmes impliquant les ressources, nous avons proposé de les traiter en même temps. Nous avons proposé un modèle sous forme de programme mathématique pour la sélection des MPR aussi bien pour l'optimisation de la diffusion que pour la qualité de service sur base d'un nombre quelconque de métriques.

Nous avons ensuite proposé une heuristique générique pour résoudre le problème ainsi modélisé. Cette heuristique est ensuite appliquée à la sélection des relais multipoint en prenant en compte trois métriques de qualité de service, à savoir le débit, le délai et la probabilité de réception correcte ainsi qu'une métrique spécifique à OLSR, le Willingness. Des évaluations comparatives de notre heuristique avec les solutions existantes ont été menées sur des instances de graphes de tailles, de densités et de distributions spatiales de nœuds différentes. Elles montrent que notre heuristique est la seule parmi les heuristiques proposées pour la qualité de service qui :

- maintient un nombre de relais multipoints quasi identique à celui des heuristiques utilisées dans les protocoles best-effort.
- conserve un temps d'exécution raisonnable même lorsque la taille du réseau augmente considérablement.

De plus, comparativement à la plupart des heuristiques existantes, notre heuristique sélectionne les liaisons présentant les meilleures valeurs pour les métriques dans la plupart des cas. La seule heuristique qui produit de meilleurs résultats a été proposée dans [36] et elle fournit les valeurs optimales. Néanmoins, cette dernière ne prend en compte qu'une seule métrique à la fois et atteint des temps d'exécution ainsi qu'un nombre de MPR très élevés qui suggèrent qu'elle peut difficilement supporter le passage à l'échelle. Dans une autre série d'évaluations nous avons comparé les valeurs des métriques obtenues par notre heuristique à celle de l'heuristique utilisée dans OLSR natif, ainsi qu'aux valeurs approchées des optima qui seraient obtenus en considérant chaque métrique individuellement avec le même nombre de MPR. Les résultats montrent que, même en prenant en compte quatre métriques

simultanément, notre heuristique n'est qu'à un écart variant entre 1% et 8% des optima. De plus, elle améliore les résultats de l'heuristique d'OLSR natif jusqu'à 60% sur les valeurs de certaines métriques.

Nous avons mis en œuvre les mécanismes proposés pour obtenir une version du protocole OLSR intégrant quatre critères de qualité de service. Nous avons proposé une mise en œuvre de cette version d'OLSR dans l'environnement OPNET modeler. Certes, nous défendons l'idée que l'estimation des valeurs des métriques de qualité de service devrait s'effectuer au niveau de la couche MAC. Ces valeurs devraient être mises à la disposition du protocole de routage par le biais d'un service spécifique entre la couche MAC et la couche réseau. Néanmoins, afin de pallier l'absence d'un tel service, le protocole de routage doit prévoir des mécanismes de substitution pour estimer ces valeurs en interne. Nous avons donc proposé notre modèle d'estimation des valeurs des métriques de qualité de service que sont le débit, le délai et la probabilité de réception correcte. La version d'OLSR avec qualité de service Q-OLSR ainsi obtenue a été évaluée par simulation suivant plusieurs scénarios en milieu ouvert et urbain aussi bien pour le trafic best-effort que pour le trafic d'une application imposant des contraintes de qualité de service rigoureuses, à savoir la vidéoconférence.

Les résultats de ces évaluations montrent que malgré une légère augmentation du délai observé dans les WLAN et l'introduction d'un trafic supplémentaire dû à la nécessité de transmettre les informations de la QoS, Q-OLSR améliore considérablement le débit disponible dans le WLAN, et ce, grâce à l'efficacité des mécanismes mis en œuvre pour la sélection de MPR.

Lorsqu'il achemine le trafic des applications best-effort, Q-OLSR améliore de 30% le taux de réception comparativement à OLSR natif tout en offrant des délais équivalents à ceux obtenus par ce dernier.

Les résultats des simulations montrent que la vidéoconférence n'est supportée de manière satisfaisante dans le MANET que lorsque la source et la destination se trouvent à un saut l'une de l'autre. Ils montrent également que Q-OLSR achemine du trafic de vidéoconférence à des destinations situées jusqu'à 6 sauts en garantissant un taux de réception supérieur à celui qu'OLSR natif réalise pour des destinations situées à deux sauts.

Enfin, il convient de noter que, contrairement aux approches cross-layer, les performances de notre version sont dues aux seuls mécanismes de la QoS mis en œuvre au niveau du routage.

6.2 Perspectives

Nous avons proposé un cadre pour la représentation des réseaux mobiles ad hoc qui peut être vu comme un début d'efforts vers la formalisation de la conception des protocoles pour la qualité de service. En effet, l'IETF a défini un cadre pour la conception de protocoles de routage best-effort pour les réseaux mobiles ad hoc. Il existe des recommandations pour la qualité de service dans les réseaux IP en général, mais il manque un cadre conceptuel pour la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc. Sa mise en oeuvre faciliterait à la fois la conception et la comparaison des solutions proposées.

Les modèles mathématiques pour le problème de la sélection des MPR que nous avons proposés aussi bien pour la diffusion que pour la prise en compte des paramètres de qualité de service sont des modèles approchés et ce, pour deux raisons :

- le fait d'avoir choisi OLSR comme protocole cible et par conséquent les relais multipoints, nous a limités à ne considérer que le premier et le second voisinages. Il serait intéressant de formuler un modèle où le voisinage le plus éloigné est un paramètre q qui peut varier, cela devrait permettre d'obtenir :
 - une optimisation plus fine de la diffusion ;
 - au travers de la sélection des MPR en fonction des paramètres de la qualité de service, des routes à qualité de service de longueur q .
- nous avons privilégié une heuristique de type glouton parce que le simple greedy [30] a prouvé son efficacité dans OLSR, notamment grâce à son temps d'exécution, sa faible complexité et sa résistance face au passage à l'échelle. Il serait intéressant de mener une investigation sur de nouvelles méthodes de résolution, basées notamment sur les métaheuristiques pour traiter le problème modélisé.

Dans OLSR, les routes sont calculées proactivement et le type de trafic à acheminer n'est pas toujours connu au moment où ce calcul est effectué. Une idée consisterait à calculer des routes à la demande lorsque les routes calculées proactivement vers la destination ne satisfont pas une demande de qualité de service spécifique. Nous pensons qu'elle mériterait d'être évaluée. Il en est de même en ce qui concerne l'application de l'extension Fisheye [90] pour augmenter la capacité de Q-OLSR à passer l'échelle. Une idée analogue pourrait en effet être appliquée lors du calcul des routes vers les différentes destinations en modifiant la fréquence et l'intensité des calculs en fonction du type d'applications liées au trafic échangé avec chacune de ces destinations.

Une autre perspective qui mérite une attention très particulière concerne un mécanisme efficace pour la diffusion des valeurs des métriques de qualité de service. Avec 50% de trafic supplémentaire lié à l'activité du protocole de routage et sans aucun mécanisme de réservation, Q-OLSR apporte des améliorations intéressantes. Si les valeurs des métriques pouvaient être disséminées différemment, la réduction du trafic qui en résulterait libérerait des ressources au profit du trafic des applications.

Même si nous avons voulu une implémentation d'OLSR avec qualité de service qui dépende le moins possible des autres couches, il serait intéressant à des fins de validation de réaliser des évaluations où des mécanismes de qualité de service sont également mis en œuvre dans les autres couches du modèle OSI. Le formalisme proposé pour la représentation des MANET et qui a permis une formulation générique à la fois des problèmes étudiés et de l'heuristique proposée, pourrait être appliqué à une approche cross-layer reposant sur des services génériques au niveau de chaque couche. Ceci permettrait d'éviter les écueils relevés notamment dans des cas où les protocoles sont constamment modifiés pour être adaptés à une approche cross-layer dédiée à une application particulière.

Les efforts déployés dans le cadre de cette thèse pour mettre en œuvre des mécanismes génériques pour la qualité de service tout en maintenant les efforts liés à l'optimisation de la diffusion, nous ont fait prendre conscience que la mise en œuvre de la sécurité pourrait nous exposer aux mêmes difficultés. Il serait donc intéressant de voir dans quelle mesure le formalisme proposé dans le cadre de cette thèse pourrait être utilisé, voire étendu, pour permettre la satisfaction des contraintes de sécurité et de qualité de service de façon simultanée. En effet, au même titre que les applications multimédias ont fait de la qualité de service une fonctionnalité de base d'un protocole de routage pour les MANET, le développement des mesh networks qui proposent d'utiliser les MANET comme la prolongation des réseaux à infrastructures, notamment Internet va demander une multiplication des efforts en matière de sécurité.

7 Publications

Revue internationale avec comité de lecture

Ganstou D., Sondi P. et Hanafi S. (2009), «Revisiting Multipoint Relay Selection in Optimized Link State Routing Protocol», *Int. J. Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 2(1), pp. 4-15 (2009)

Conférence internationale avec actes et comité de lecture

Sondi P., Gantsou D. et Lecomte S. (2010), « Mobile Ad Hoc Network-based Monitoring of Battlefields or Rescue Operations in Urban Scenarios », *European Modelling Symposium*, Pise, Italie (2010)

Sondi P., Gantsou D. et Lecomte S. (2010), « Performance Evaluation of Multimedia Applications over an OLSR-based Mobile Ad Hoc Network using OPNET », UKSIM, pp. 567-572, 2010 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge, UK (2010)

Sondi P. et Gantsou D. (2009), « Voice Communication over Mobile Ad Hoc Networks: Evaluation of a QoS Extension of OLSR using OPNET », *AINTEC'09*, ACM, Bangkok, Thaïland (2009)

Gantsou D. et Sondi P. (2007), « Efficient Selection of Multipoint Relays in Wireless Ad Hoc Networks with Realistic Physical Layer », *AINTEC 2007*, LNCS 4866, Springer-Verlag, pp. 48-59 (2007)

8 Bibliographie

- [1] Corson, M. S. and Macker, J. (1999), “Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations”, IETF, RFC 2501 (1999)
- [2] Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D. (2007), “The dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4”, IETF, RFC 4728 (2007)
- [3] Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S. (2003), “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing”, IETF, RFC 3561 (2003)
- [4] Clausen, T., and Jacquet, P. (2003), “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)”, IETF, RFC 3626 (2003)
- [5] Ogier, R., Templin, F. and Lewis, M. (2004), “Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)”, IETF, RFC 3684 (2004)
- [6] Roy, A. and Chandra, M. (2010), “Extensions to OSPF to Support Mobile Ad Hoc Networking”, IETF, RFC 5820 (2010)
- [7] Hanzo, L. and Tafazolli, R. (2007), “A survey of QoS routing solutions for Mobile ad hoc Networks”. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 9(2), pp. 50-70 (2007)
- [8] Qin, L. and Kunz, T. (2004) “Survey on Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols and Cross-Layer Design” in Technical Report of Carleton University, Aug. (2004)
- [9] Srivastava, V. and Motani, M. (2005) “Cross-layer design: A survey and the road ahead,” IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 12, pp. 112-119 (2005)
- [10] Mangold, S., Choi, S., May, P., Klein, O., Hiertz, G. and Stibor, L. (2002), “IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service”, Proc. of European Wireless (2002)
- [11] Jiang, D. and Delgrossi, L. (2008), “IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments”, In Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), pages 2036-2040 (2008)
- [12] IEEE 802.11n-2009—Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, doi:10.1109/IEEESTD.2009.5307322 (2009)
- [13] Royer, E. M. and Toh, C.-K. (1999), “A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks”, IEEE Personl Communications, pp. 46-55 (1999)
- [14] Abolhasan, M., Wysocki, T. and Dutkiewicz, E. (2004), “A Review of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks”, Ad Hoc Networks (Elsevier) Journal, (2) pp.1-22(2004)
- [15] Aggelou, G. and Tafazolli, R. (1999), “RDMAR: A bandwidth-efficient routing protocol for mobile ad hoc networks”, In Proc. 2nd ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM’99), p. 26–33 (1999)
- [16] Perkins, C. E. and Bhagwat, P. (1994), “Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers”, In Proc. of ACM SIGCOMM’94, pp. 234-244, London, UK (1994)
- [17] Pei, G., Gerla, M. and Chen, T.-W. (2000), “Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks”, In Proc. of ICC 2000, New Orleans, LA, USA (2000)

Bibliographie

- [18] Basagni, S., Chlamtac, I., Syrotiuk, V. R. and Woodward, B. A. (1998), "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)", In Proc. of ACM/IEEE MobiCom'98, pp. 76-84, New York (1998)
- [19] Chroboczek, J. (2010), "The BABEL routing protocol", IETF draft (2010)
- [20] Haas, J. (1997), "A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks", Proc. of IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications 97, pp. 562-566 (1997)
- [21] Park, V. D. and Corson, M. S. (1997), "A highly adaptive distributed algorithm for mobile wireless networks", in Proc. of INFOCOM, April (1997)
- [22] Patel, S., Elleithy, K. and Rizvi, S. S. (2009), "Hierarchically Segmented Routing (HSR) Protocol for MANET", 6th International Conference on Information Technology: New Generations ITNG 2009, Las Vegas, Nevada, USA, April 27-29 (2009)
- [23] Theoleyre, F. and Valois, F. (2005), "Virtual Structure Routing in Ad hoc Networks", Proc. of International Conference on Communications, Seoul, Corée (2005)
- [24] Ko, Y. B. and Vaidya, N. H. (1998), "Location-Aided Routing in Mobile Ad hoc Networks", Proc. of ACM/IEEE MobiCom, pp. 66-75 (1998)
- [25] Karp, B. and Kung, H. T. (2000), "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks", Proc. of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 243-254, Boston, Massachussets, USA (2000)
- [26] Cheung, S. Y., Ammar, M. H. and Ahamad, M. (1990), "The Grid Protocol: A High Performance Scheme for Maintaining Replicated Data", Proc. of the 6th International Conference on Data Engineering, pp. 438-445 (1990)
- [27] Lebedev, D. (2006), "Modélisation analytique des réseaux dynamiques", Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique (2006)
- [28] Tseng, Y.-C., Ni S.-Y., Chen Y.-S. and Sheu J.-P. (2002), "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network", Wireless Networks, vol. 8, pp. 153-167 (2002)
- [29] Feeney, L. M. and Nilsson, M. (2001), "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment". In IEEE Conf on Computer Communications (Infocom'01), April (2001)
- [30] Qayyum, A., Laouti, A. and Viennot, L. (2000), "Multipoint Relaying: An Efficient Technique for Flooding in Mobile Wireless Networks", INRIA RR-3898 (2000)
- [31] Baccelli, E., Jacquet, P., Nguyen, D. and Clausen, T. (2009), "OSPF Multipoint Relay (MPR) Extension for Ad Hoc Networks", RFC 5449, IETF (2009)
- [32] Cordero, J. A., Clausen, T. and Baccelli, E. (2010), "MPR+SP: Towards a Unified MPR-based MANET Extension of OSPF", RR 7319, INRIA (2010)
- [33] Beasley, J. E. (1987), "An algorithm for set covering problem", European Journal of Operational Research, Volume 31, Issue 1, July (1987)
- [34] Garey, M.R. and Johnson, D.S. (1979), "Computers and intractability. A guide to the theory of NP-Completeness", Freeman, Oxford, UK (1979)
- [35] Wang, Z. and Crowcroft, J. (1996), "Quality of Service Routing for Supporting Multimedia Applications". IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 14, n° 7 (1996)

- [36] Ge, Y., Kunz, T. and Lamont, L. (2003), "Proactive QoS Routing in Ad Hoc Networks". 2nd International Conference on Ad Hoc networks, LNCS 2865, Springer, Berlin (2003)
- [37] Badis, H. and Al Agha, K. (2005), "QOLSR, QoS routing for Ad Hoc Wireless Networks Using OLSR". In European Transactions on Telecommunications, vol. 15, n° 4 (2005)
- [38] Nguyen, D-Q. and Minet, P. (2007), "Quality of Service Routing in a MANET with OLSR". Journal of Universal Computer Science, vol. 13, n° 1, pp. 56-86 (2007)
- [39] Crawley, E., Nair, R., Rajagopalan, B. and Sandick, H. (1998) "A Framework for QoS-based Routing in the Internet", RFC 2386, IETF, August (1998)
- [40] Cavalli A. (*Sous la direction de*) (2001), "Ingénierie des protocoles et qualité des services", collection IC2 Réseaux et Télécoms, Paris, Hermès, 2001.
- [41] Chaudet C. (2005), "Protocole IEEE 802.11: qualité de service", Techniques de l'ingénieur, Télécoms A. 2005, vol. TEA2, n° TE7379 (2005)
- [42] Singh, S., Woo, M. and Raghavendra, C. S. (1998), "Power-aware routing in mobile ad hoc networks". in Proc. of Mobile Computing and Networking, pp. 181-190 (1998)
- [43] Toh, C.-K. (2001), "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks", IEEE Trans. Commun., vol. 39, no. 6, pp. 138-147 (2001)
- [44] Misra, A. and Banerjee, S. (2002), "MRPC: Maximizing network lifetime for reliable routing in wireless environments" in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., Orlando, Florida (2002)
- [45] Djenouri, D. and Badache, N. (2006), "New power-aware routing protocol for mobile ad hoc networks". Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing, Vol. 1, N° 3, 126-136 (2006)
- [46] Patnaik, P. K. and Mall R. (2007), "Power and Battery Aware Routing in Mobile Ad hoc Networks". Icfai Journal of Computer Sciences, Vol. 1, N° 1 (2007)
- [47] Sheng, M. Li, J. and Shi, Y. (2003), "Routing protocol with QoS guarantees for ad-hoc network". Electronics Letters, vol. 39, pp. 143.145 (2003)
- [48] Nikaein, and N. Bonnet, C. (2001), "Hybrid ad hoc routing protocol –HARP", in Proc. Int. Symp. Telecommunications (2001)
- [49] Yawut, C., Paillassa, B. and Dhaou, R. (2007), "Mobility versus Density Metric for OLSR Enhancement". 3rd AINTEC, LNCS Volume 4866, Springer, Berlin (2007)
- [50] Lin, C. R. and Liu, J.-S. (1999), "Qos routing in ad hoc wireless networks", IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, pp. 1426-1438, (1999)
- [51] Nguyen, D-Q. and Minet, P., Adjih, C., and Plesse, T. (2009), "Implementation and performance evaluation of a quality of service support for OLSR in a real MANET". SimuTools (2009)
- [52] Chen, S. and Nahrstedt, K. (1999), "Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks". IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, pp. 1488-1505 (Aug. 1999)
- [53] Bashandy, A. R. Chong, E. K. P. and Ghafour, A. (2005), "Generalized quality-of-service routing with resource allocation". IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 23, pp. 450-463, (2005)

Bibliographie

- [54] Wang, M. and Kuo, G.-S. (2005), “An application-aware QoS routing scheme with improved stability for multimedia applications in mobile ad hoc networks”. In Proc. IEEE Vehicular Technology Conf., pp. 1901-1905, (2005)
- [55] Benaissa, M. and Lecuire, V. (2004), “A New Smoothing Jitter Algorithm for Voice over Ad Hoc Networks”. MWCN 2004: 167-178 (2004)
- [56] Barolli, L. Koyama, A. and Shiratori, N. (2003), “A QoS routing method for ad-hoc networks based on genetic algorithm”. in Proc. 14th Int. Wksp. Database and Expert Systems Applications, pp. 175-179, (Sept. 2003)
- [57] Abdrabou, A. and Zhuang, W. (2006), “A position-based qos routing scheme for UWB mobile ad hoc networks”. IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 24, pp. 850-856, (2006)
- [58] Rubin, I. and Liu, Y.-C. (2003), “Link stability models for QoS ad hoc routing algorithms”. In Proc. 58th IEEE Vehicular Technology Conf., vol. 5, pp. 3084-3088, (2003)
- [59] Clark, B.N., Colbourn, C. J. and Johnson, D. S. (1990), “Unit Disk Graphs”, Discrete Mathematics, vol. 86, no. 1-3, pp. 165–177, 1990.
- [60] Huson, M.L. and Sen, A. (1995), “Broadcast scheduling algorithms for radio networks”. Military Communications Conference, IEEE MILCOM'95, vol. 2, pp. 647–651 (1995)
- [61] Erdős, P. and Rényi, A. (1959), “On random graphs”, Publicationes Mathematicae (Debrecen), Vol 6, pp 290-297 (1959)
- [62] Stojmenovic, I., Nayak, A. and Kuruvila, J. (2005), “Design Guidelines for Routing Protocols in Ad Hoc and Sensor Networks with a realistic Physical layer”. IEEE Communication Magazine 43 (3), pp. 101 – 106 (2005)
- [63] Ingelrest, F. and Simplot-Ryl, D. (2006), “Maximizing the Probability of Delivery of Multipoint Relay Broadcast Protocol in Wireless Ad Hoc Networks with a Realistic Physical Layer”. LNCS Vol.4325, Springer-verlag, Berlin (2006)
- [64] Guo, S. and Yang, O. (2007), “Localized operations for distributed minimum energy multicast algorithm in mobile ad hoc networks”, IEEE Transactions on parallel and distributed systems, Vol. 18, n° 2, february (2007)
- [65] Călinescu , G., Măndoiu , I., Wan , P.-J. and Zelikovsky A. (2001), “Selecting forwarding neighbors in wireless Ad Hoc networks”, Proceedings of the 5th international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications, p.34-43, Rome, Italy, july (2001)
- [66] Adjih, C., Jacquet, P. and Viennot, L. (2002), “Computing connected dominated sets with multipoint relays”, in INRIA Rapport de Recherche n° 4597, INRIA Rocquencourt, France (2002)
- [67] Stojmenovic, I., Seddigh, M. and Zunic J., “Dominating Sets and Neighbor Elimination Based Broadcasting Algorithms in Wireless Networks”. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 13, n° 1 pp. 14-25 (2002)
- [68] Ingelrest, F., Simplot-Ryl, D. and Stojmenovic, I. (2007), “Smaller Connected Dominating Sets in Ad Hoc and Sensor Networks based on Coverage by Two-Hop Neighbors”, in COMSWARE 2007, january (2007)
- [69] Härri, J., Bonnet, C. and Filali, F. (2005), “OLSR and MPR: mutual dependences and performances”, Med-Hoc-Net 2005, The 4th IFIP Mediterranean Ad-Hoc Networking Workshop, Île de Porquerolles, France, June 21-24 (2005).

- [70] Mans, B. and Shrestha, N. (2004), "Performance Evaluation of Approximation Algorithms for MPR Selection". Med-Hoc-Net'04, Bodrum, Turkey, June 27-30 (2004)
- [71] Chvátal, V. (1979), "A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem", *Mathematics of Operations Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 233-235 (Aug., 1979).
- [72] Costa, L. H. M. K., Fdida, S. and Duarte, O. C. M. B. (2002), "Developing scalable protocols for three-metric QoS routing", *Computer networks (Elsevier) Journal*, Vol. 39, n° 6, pp. 713-727 (2002)
- [73] Badis, H. and Al Agha, K. (2003), "Distributed Algorithms for Single and Multiple-Metric Link State QoS Routing", In *IFIP MWCN'03: International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks*, Singapore, October (2003)
- [74] Martins, E.Q.V (1984), "On a multicriteria shortest path problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 16 pp:236-245 (1984)
- [75] Paschos, V. and Demange, M. (1994), "Approximation algorithms for minimum set covering problem: a survey", *Foundations of Computing and Decision Sciences* 19(3), (1994)
- [76] Gantsou, D., Sondi, P. and Hanafi, S. (2009), "Revisiting Multipoint Relay Selection in Optimized Link State Routing Protocol". *Int. J. Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 2, n° 1, pp. 4-15 (2009)
- [77] Nemhauser, G. L. and Wolsey, L. A. (1999), "Integer and combinatorial optimization", *Wiley-Interscience*, New York (1999)
- [78] Ilog (2003), "Ilog Cplex 7.0. Reference manual", Collectif Ilog, (2003)
- [79] Ehrgott, M. (2005), "Multicriteria optimization". Springer (2005)
- [80] Gantsou, D. and Sondi, P. (2007), "Efficient Selection of Multipoint Relays in Wireless Ad Hoc Networks with Realistic Physical Layer". 3rd AINTEC, LNCS Volume 4866, Springer (2007)
- [81] Rice, J. A. (1994), "Mathematical Statistics and Data Analysis", Second Edition, Duxbury Press, pp. 96-97 (1994)
- [82] Broch, J., Maltz D.A., Johnson, D.B., Hu Y.-C. and Jetcheva J. (1998), "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols", In *Proc. of ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking* (1998)
- [83] Navidi, W. and Camp, T. (2004), "Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model", *IEEE Transactions on Mobile Computing* 3(1), pp. 99-108 (2004)
- [84] Dijkstra, E. W. (1971), "EWD316: A Short Introduction to the Art of Programming", T. H. Eindhoven, The Netherlands, Aug. (1971)
- [85] Leguay, J., Conan, V. and Friedman, T. (2006), "QoS Routing in OLSR with Several Classes of Service", *Proc. IEEE PerCom Workshop on Pervasive Wireless Networking*, (2006)
- [86] Pillay-Esnault, P. and Lindem, A. (2008), "OSPFv3 Graceful Restart", RFC 5187, IETF (2008)
- [87] Sondi, P. and Gantsou, D. (2009), "Voice Communication over Mobile Ad Hoc Networks: Evaluation of a QoS Extension of OLSR using OPNET", *AINTEC'09*, Bangkok, ACM Digital Library (2009)

Bibliographie

- [88] Sondi, P., Gantsou, D. and Lecomte, S. (2010) “Performance Evaluation of Multimedia Applications over an OLSR-Based Mobile Ad Hoc Network Using OPNET”, Proc. Of UKSIM, pp.567-572, 12th ICCMS (2010)
- [89] Sondi, P., Gantsou, D. and Lecomte, S. (2010), “Mobile Ad Hoc Network-based Monitoring of Battlefields or Rescue Operations in Urban Scenarios”, Proc. of 4th European Modelling Symposium, Pise, Italie (2010)
- [90] Nguyen, D.-Q., Minet, P. (2007), “Scalability of the OLSR Protocol with the Fish Eye Extension”, Proc. of the Sixth International Conference on Networking, April (2007)