

N° d'ordre:

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABÈS DE SIDI BEL ABBÈS
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE
LABORATOIRE EEDIS

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

En cotutelle internationale avec l'université de Haute Alsace -
France

Filière : Informatique
Spécialité : Informatique

Par

M^R BELKHIRA SID AHMED HICHAME

OPTIMISATION DE LA QoS DANS LES RESEAUX ADHOC MOBILES

Soutenue le ..-.-2020 devant le jury :

Pr. BOUCHIHA DJELOUL	C. U. de Naama	Président du jury
Pr. SERHROUCHNI AHMED	Telecom ParisTech	Examineur
Pr. BEN OTHMAN JALEL	University of Paris	Examineur
Pr. BENMAMMAR BADR	Université de Tlemcen	Examineur
Dr. BOUKLI-HACENE SOFIANE	UDL SBA	Directeur de thèse
Pr. LORENZ PASCAL	UHA	Co-Directeur de thèse

Année Universitaire : 2019 - 2020

Je dédie ce modeste travail à : Mes très chers parents pour tous ses sacrifices et grâce à vous je n'ai manqué de rien MERCI ,je tien a remercier ma petite famille ma femme mes enfants d'avoir été très passion et d'avoir fait des sacrifices avec moi durant tout cette période

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mes directeurs de thèse Dr. BOUKLI-HACENE Sofiane, Pr. Pascal LORENZ ainsi que Dr Marc GILG membre de l'équipe GRTC laboratoire IRIMAS pour l'encadrement de qualité et les précieux conseils durant toute la période du travail.

Mes vifs remerciements vont au Pr. Bouziani et Dr. Belkheir Ainsi que mon collègue Mr Naimi Mostefa, je ne peux à travers cette petite page dévouer mes sincère gratitudes quand à ces grandes personnes qui m'ont soutenu tout au long de ma thèse de doctorat. Merci! Pour m'avoir toujours motivé

Colmar, le 7 juillet 2020.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
1 GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX SANS FIL	5
1.1 INTRODUCTION	6
1.2 LES RÉSEAUX SANS FIL	7
1.2.1 Définition	7
1.2.2 Technologie de communication sans fil	7
1.2.3 Types des réseaux sans fil	8
1.2.4 Classification des réseaux mobiles selon l'infrastructure	9
1.3 LES RÉSEAUX MOBILES AD HOC (MANET)	11
1.3.1 Définition	11
1.3.2 Historique et évolution des réseaux ad hoc mobiles	11
1.3.3 Applications des réseaux mobiles ad hoc	14
1.3.4 Présentation des réseaux Ad-Hoc mobile	16
1.3.5 Modes de communication	17
1.3.6 Contraintes liés aux réseaux Ad-Hoc	17
CONCLUSION	18
2 PROTOCOLES DE ROUTAGE POUR LES RÉSEAUX AD-HOC	19
2.1 INTRODUCTION	20
2.2 ROUTAGE RÉSEAUX MOBILES ADHOC	20
2.2.1 Définition	20
2.2.2 Contrainte de routage (réseaux mobiles adhoc)	21
2.2.3 Classification des protocoles de routage (réseaux mobiles adhoc)	21
2.2.4 Le protocole OLSR	31
2.3 CONCLUSION	42
3 LA QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	44
3.1 INTRODUCTION	46
3.2 DÉFINITION DE LA QUALITÉ DE SERVICE	46
3.3 MÉTRIQUES DE LA QUALITÉ DE SERVICE	47
3.3.1 Bande passante	47
3.3.2 Délai de bout en bout	47
3.3.3 Gigue (variation du délai)	48

3.3.4	La perte des paquets	48
3.3.5	Approches IntServ/RSVP et Diffserv dans les réseaux filaires	48
3.4	QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC	50
3.5	APPROCHES DE QUALITÉS DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	52
3.5.1	Approche FQMM (Flexible QoS Model for MANETs)	52
3.5.2	Approche SWAN (Service Differentiation in Wireless Ad Hoc Networks)	53
3.5.3	iMAQ (Integrated Mobile Ad hoc Qos framework)	54
3.6	QUALITÉ DE SERVICE (QoS) DANS LA COUCHE MAC (MEDIUM ACCESS CONTROL)	54
3.6.1	Norme IEE 802.11 de différenciation de services et ses extensions	55
3.6.2	MACA/PR (Multiple Access Collision Avoidance with Piggyback Reservation)	55
3.7	ROUTAGE AVEC QoS DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	56
3.7.1	Défis des protocoles de routage avec QoS dans les réseaux ad hoc mobiles	56
3.7.2	Quelques approches de routage dans les réseaux ad hoc mobiles	57
3.8	PROTOCOLES DE SIGNALISATION	58
3.8.1	INSIGNIA	59
3.8.2	Dynamic QoS / dRSVP	60
3.9	CONSERVATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILE	60
3.9.1	Formes de dissipation d'énergie dans un nœud capteur	61
3.9.2	Surconsommation d'énergie	62
3.10	CONSERVATION D'ÉNERGIE ET QoS	63
3.10.1	Techniques du Duty-cycling	63
3.10.2	Protocoles Sleep/Wakeup	63
3.11	CONSERVATION D'ÉNERGIE AU NIVEAU MAC	64
3.11.1	Les protocoles fondées sur les techniques TDMA (Time Division Multiple Access)	64
3.11.2	Protocoles MAC avec contention	65
3.11.3	Protocoles MAC hybrides	66
3.12	ROUTAGE ET CONSERVATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AHWSN	66
3.12.1	EARLEAHSN (Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks)	67
3.12.2	EARCBSN (Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks)	67
3.12.3	GBR (Gradient-Based Routing)	67
3.12.4	Conservation d'énergie au niveau transport	68
	CONCLUSION	69
4	NOUVEAU MECHANISME WRE (WEIGHTING ENERGY RECHABILITY), CONSERVATION D'ENERGIE ET ÉQUILIBRAGE DE CHARGE POUR LA QoS	71
4.1	INTRODUCTION	73
4.2	RAISONS DU CHOIX DU PROTOCOLE OLSR	73

4.3	MOTIVATIONS ET DÉFIS	73
4.4	NOTION DES RELAIS MULTIPOINTS (MPR) DANS LES RÉSEAUX ADHOC	74
4.4.1	Notations Mathématiques	75
4.4.2	MPR, optimisation de la diffusion et amélioration de la qualité de service	76
4.5	MPR ET QUALITÉ DE SERVICE	80
4.5.1	GE ₃	80
4.5.2	Calcul des routes à qualité de service	81
4.6	NOTION DE DURÉE DE VIE DE RÉSEAU	81
4.6.1	Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants . . .	82
4.6.2	Durée de vie basée sur la couverture	82
4.6.3	Durée de vie basée sur la connectivité	83
4.6.4	Durée de vie basée sur les exigences de la qualité de service	84
4.7	PROTOCOLE WRE-OLSR	84
4.7.1	Messages de contrôle et algorithme d'inondation dans WRE-OLSR	84
4.7.2	Nouveau message HELLO dans WRE-OLSR	85
4.7.3	Sélection des MPRs dans le protocole WRE-OLSR	86
4.7.4	Démonstration	89
4.7.5	Nouvelle approche pour le calcul de l'ensemble MPR . .	89
4.7.6	Choix du paramètre de pondération entre l'énergie rési- duelle et la reachability w	91
4.7.7	Sélection du paramètre W	92
4.7.8	Métriques d'évaluation	94
4.7.9	Paramètres de simulation	95
4.7.10	Résultats et discussions	97
4.7.11	Evaluation des paramètres de QoS	97
4.8	PROTOCOLE WRE-OLSR+	103
4.8.1	Nouvelle fonction pour calculer le paramètre de pondé- ration w	107
4.8.2	Résultats et discussions	108
4.8.3	Évaluation des paramètre de la QoS	110
4.9	CONCLUSION	116
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	117
	LISTE DES PUBLICATIONS	120
	BIBLIOGRAPHIE	121
	NOTATIONS	134

LISTE DES FIGURES

1.1	Classification des réseaux sans fil	9
1.2	Exemple de mode infrastructure	10
1.3	Exemple de mode ad Hoc.	11
1.4	Architecture d'un réseau ad-hoc	14
1.5	Exemple d'application des réseaux ad hoc	16
1.6	exemple de modélisation d'un réseau ad hoc	16
2.1	Protocole de routage à plat	22
2.2	Routage Hiérarchique	22
2.3	Classification des protocoles de routage	25
2.4	Procédure de découverte de route du protocole AODV	27
2.5	Exemple de routage ZRP (Lohier et al. 2002)	28
2.6	Différents types de nœuds dans le protocole CBRP	28
2.7	Synthèse des Protocoles de routage Ad hoc	30
2.8	Apport de l'implémentation des MPRs	33
2.9	Format du paquet OLSR	34
2.10	Format du message « Hello »	34
2.11	Format du message « TC »	36
2.12	Exemple d'informations de voisinage dans OLSR	37
2.13	Diffusion par inondation classique Vs inondation par relais multipoints	39
2.14	Diffusion par inondation classique Vs inondation par relais multipoints	40
2.15	Optimisation de l'inondation par des relais multipoint	41
2.16	Format des messages MID	41
2.17	Format des messages HNA	42
3.1	Le mode Intserv /RSVP	49
3.2	Routeur à intégration de services	49
3.3	Le modèle DiffServ	49
3.4	Solutions de QoS pour les réseaux ad hoc.	51
3.5	Le modèle FQMM	53
3.6	Le modèle SWAN	54
3.7	Le modèle iMAQ	54
3.8	L'architecture du protocole INSIGNIA	60
4.1	Message HELLO dans OLSR	85
4.2	Message HELLO dans WRE-OLSR	85
4.3	Message TC dans OLSR	85
4.4	Message TC dans WRE-OLSR	86
4.5	sélection des MPR	87

4.6	comparaison de la consommation d'énergie entre un nœud MPR et un nœud Non-MPR. (Lakrami & Elkamoun 2012)	88
4.7	Exemple de détermination du MPR set	89
4.8	Variation de $f(w)$ en fonction de w avec $w \in [0,1]$	92
4.9	Nombre des noeuds épuisé en fonction du paramètre w	93
4.10	L'impact de w sur les paramètres de la QoS	93
4.11	l'effet de la densité du reseau sur le nombre de nœuds morts (dead nodes)	98
4.12	l'effet de la mobilité sur le Nombre de nœuds morts (dead nodes)	98
4.13	Effet de la mobilité du réseau sur le délai de transmission	99
4.14	Effet de la densité du réseau sur le délai de transmission	100
4.15	effet de la densité du réseau sur les messages de contrôle	101
4.16	Effet de la densité du réseau sur le nombres des paquets perdus	102
4.17	effet de la mobilité du réseau sur le nombre de noeuds morts	102
4.18	Mécanisme d'équilibrage de charge par mesure de dispersion	105
4.19	Variation de l'écart-type dans le temps	106
4.20	Graphe de $w=f(\text{écart})$	107
4.21	Exemple de fonctionnement de WRE-OLSR+	108
4.22	Comparaison entre les MPRs qui utilisent OLSR et les MPRs qui utilisent WRE-OLSR+	109
4.23	variation de l'écart type des énergies en fonction du temps	110
4.24	l'effet de la densité sur les noeuds morts	111
4.25	l'effet de la vitesse sur les noeuds morts	112
4.26	l'effet de la densité sur la surcharge	113
4.27	Effet de densité de nœuds sur paquet perdu	114
4.28	Effet de la vitesse du nœud sur le paquet perdu	114
4.29	Effet de la vitesse du nœud sur le délai moyen de bout en bout	115
4.30	Effet de la densité des nœuds sur le délai moyen de bout en bout	115

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison entre les réseaux sans fil	10
2.1	Table de routage calculée par le nœud A	42
4.1	Paramètres de simulation	96
4.2	table 2	96
4.3	Paramètres de simulation d'OLSR et WRE-OLSR sous NS-2	109

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE GÉNÉRAL

Ces dernières années, notre vie quotidienne a été bouleversée par la forte croissance des technologies sans fil et le besoin en connectivité, entre les individus, et entre les individus et les objets. Ces nouvelles technologies impactent directement notre quotidien sans en apercevoir, permettant de faciliter notre vie et d'atteindre un confort avéré. Chez-soi, on désire automatiser le fonctionnement de nos foyers (climatisation, chauffage, surveillance...) ce qui a donné naissance au « smart home » ou « smart building ». Une fois sortie de la maison, nous sommes faces à toute une panoplie de moyens de transports automatisés et même téléguidés, d'où on entend parler de « smart transportation » et « Vanets ». Au travail, notre environnement est automatisé par des systèmes électroniques et informatiques connectés, contenant des ordinateurs, des tablettes des smartphones... etc. En effet, les exemples de l'implication de ces technologies dans tous les domaines sont tellement nombreux qu'ils soient cités et le sentiment d'appartenance de divers secteurs à cette nouvelle tendance demeure très fort. L'évolution des technologies électroniques et informatiques ont permis la naissance de dispositifs mobiles de petites tailles permettant de récolter diverses informations relatives à notre environnement, baptisés capteurs intelligents. On les trouve dans tous les domaines (médecine, militaire, automobile et avionique, processus industriels...). Cette émergence de ces dispositifs mobile, ajoutée à celle de l'avènement de l'internet, a permis la naissance de nouveaux réseaux mobiles sans fils et sans infrastructure regroupés sous la même appellation à savoir : AHWSN (Ad hoc and Wireless Sensor Networks). Comparés aux réseaux filaires et les réseaux cellulaires existants, ces réseaux dénués de toute infrastructure fixe et centralisée sont largement déployés, notamment dans les cas d'urgence ou dans les catastrophes, grâce à leur mobilité et facilité d'implémentation. Toutefois, plusieurs contraintes devront être prises en considération lors de la mise en réseau de ces unités mobiles. La faible taille de ces dispositifs limite leurs performances de traitement ainsi que leur capacité de stockage. Ajouté à cela, l'autonomie de la batterie de demeurant un facteur prépondérant qui impacte leur durée de vie. Due à la mobilité, la topologie du réseau demeure imprévisible avec la déconnexion fréquente des unités mobiles. Par ailleurs, est dans la plupart des cas, les réseaux AHWSN sont de très forte densité, contenant des centaines voire des milliers d'unités mobiles, ce qui rend complexe leur connectivité. Un autre paramètre très important à tenir en compte, est le degré de confidentialité et d'intégrité des informations échangées entre les nœuds du réseau qui mesure le degré de confiance apporté par ces réseaux, notamment dans des applications sensibles. Il demeure sans doute très clair que les défis

de déploiement de tels réseaux exigent de développer de nouveaux mécanismes assurant leur maturité et touchant tous les aspects précités, si nous voulons qu'ils soient compétitifs aux filaires et cellulaires existants. La qualité de service (QoS) est définie par un ensemble de critères mesurant la satisfaction du besoin d'un utilisateur à transmettre ou échanger des données dans un réseau. Ce paramètre permet de mesurer l'aptitude d'un réseau à transmettre efficacement les données avec une optimisation de ses ressources. Ceci-dit, le défi des chercheurs est d'atteindre une QoS pour les réseaux mobiles ad hoc, comparables à ceux des réseaux existants. Cet ensemble d'attributs mesurables peut être vu à différentes échelles, de la couche physique à la couche application. Dans notre recherche, nous nous sommes focalisés sur l'aspect routage de l'information dans de tels réseaux (niveau 3 du modèle OSI), tout en essayant d'améliorer la contrainte de conservation d'énergie des nœuds, qui demeure une contrainte essentielle de la QoS, permettant de maximiser la durée de vie du réseau mobile Ad hoc, sachant que les unités mobiles le constituant fonctionnent par des batteries (piles), dépourvues de toute alimentation constante et parfois dans des zones inaccessibles où il demeure impossible de remplacer leurs batteries. L'architecture plate des réseaux mobiles ad hoc contraint tous les nœuds du réseau de participer dans le relayage des données d'autres nœuds. Chaque nœud dans le réseau, est appelé pour jouer le rôle d'un routeur pour ses voisins, et ce à travers des critères prédéfinis par les algorithmes de routages implémentés. La mobilité du réseau provoque aussi des ruptures des routes préétablies et induit une surcharge supplémentaire pour l'établissement de nouvelles liaisons entre les nœuds. Toute cette activité affecte d'une manière considérable l'énergie résiduelle des nœuds et par conséquent, nuit à la durée de vie du réseau. « OLSR » est considéré parmi les protocoles de routages répandus dans les réseaux AHWSN. Ce dernier est un protocole proactif à état des liens permettant de maintenir les routes d'une manière continue entre tous les nœuds d'un réseau mobile Ad-hoc. Toutefois, ce protocole souffre d'un problème d'optimisation des ressources, notamment la conservation de l'énergie résiduelle des nœuds, ce qui a incité les chercheurs à travailler davantage dans cet aspect afin de l'améliorer, en proposant de nouveaux mécanismes d'optimisation à ce protocole de routage.

MOTIVATIONS ET PROBLÉMATIQUE

Les motivations essentielles qui nous ont amenés à se pencher dans cet axe de recherche et le déploiement technologique accentué des réseaux mobiles ad hoc ainsi que les réseaux de capteurs, en donnant naissance à l'ère de l'internet des objets et d'autres technologiques émergentes. Les différentes contraintes de mobilité, de ressources limitées en traitement, de stockage et de transmission de ces nœuds mobiles ouvrent plusieurs volets de recherche et permettent de proposer de nouveaux travaux visant d'améliorer la qualité de service des réseaux AHWSN. La problématique traitée dans notre thèse demeure l'optimisation des ressources de nœuds mobiles dans la partie routage de l'information. Ces dispositifs, fonctionnant sur des batteries de capacité limitée et appelés à être constamment actif à cause de la nature du réseau et sa forte mobilité, peuvent appa-

raître, disparaître (par extinction de leur radio, épuisement de leur énergie ou leur crash), ou se déplacer indépendamment les uns des autres. Ainsi, la topologie du réseau est en constante évolution, ce qui nous contraints de se focaliser davantage sur l'aspect énergétique du réseau, en proposant des mécanismes de routage efficaces, permettant de maximiser la durée de vie du réseau et par conséquent, améliorer sa qualité de service (QoS).

CONTRIBUTIONS ET STRUCTURE DE LA THÈSE

Comme a été cité précédemment, notre recherche était basée sur l'amélioration de la conservation d'énergie dans des réseaux implémentant le protocole OLSR comme protocole de routage. Ce dernier dont son fonctionnement qui sera détaillé tout au long de cette thèse, est principalement basé sur la notion des relais multipoints (MPRs), comme acteurs responsables à relayer les données entre les autres nœuds du réseau mobile Ad hoc. Notre recherche a conclu le développement de deux nouveaux mécanismes permettant de prolonger la durée de vie des réseaux AHWSN basés sur OLSR, sans pour autant modifier le cœur de son fonctionnement. La première approche a été baptisée à savoir :

- La première variante, baptisée WRE-OLSR et qui consiste essentiellement à introduire le critère de l'énergie résiduelle d'un nœud comme métrique dans la sélection des MPRs et ce, afin de répartir la responsabilité du routage sur tous les nœuds du réseau et alléger ceux fortement sollicités.
- La deuxième variante a été baptisée WRE-OLSR+, consistant à introduire une mesure de dispersion des énergies résiduelles du voisinage d'un nœud afin de déterminer une pondération dynamique entre l'énergie et la position de chaque nœud. L'objectif majeur de cette méthode est de rendre dynamique, le processus d'élection des nœuds MPRs et améliorer davantage l'équilibrage de charge sur tous les nœuds et par conséquent, maximiser la durée de vie du réseau.

L'efficacité de ces deux mécanismes a été vérifiée et validée par des simulations implémentant divers scénarios de réseaux mobiles ad hoc, considérablement dense et fortement mobiles. Ces deux nouvelles approches sont détaillées dans notre thèse. A cet effet, nous avons réparti notre travail comme suit :

- Le chapitre 1 présentera une vue générale sur les réseaux mobiles ad hoc et les réseaux de capteurs ainsi que leurs domaines d'applications. Ainsi, nous avons évoqué quelques contraintes de déploiement de tels réseaux et les défis attendus.
- Dans le chapitre 2, Il était jugé très utile de présenter les différents protocoles de routage qui ont été développés pour les réseaux AHWSN. Une importance particulière a été attribuée au protocole « OLSR » qui est l'axe principale de notre recherche. Nous avons détaillé son mécanisme de fonctionnement basé sur les relais multipoints ainsi que les différentes limitations de ces protocoles, dont la conservation d'énergie qui demeure l'axe principal de notre contribution.

- le chapitre3 quant à lui, étalera les différents concepts liés à la qualité de service (QoS) des réseaux Adhoc mobiles et les réseaux AHWSN. Ces derniers se présentent comme étant des réseaux sans infrastructures et à forte mobilité, d'où beaucoup de contraintes liées à la qualité de services doivent être définies et traitées.
- Le chapitre4 quant à lui, décrit principalement nos deux contributions proposées au protocole OLSR, à savoir : WRE-OLSR et WRE-OLSR+. Nous avons détaillé le fonctionnement de notre plateforme de simulation basée sur le simulateur du réseau NS-2 ainsi que les paramètres retenus afin de vérifier l'efficacité de nos approches par rapport à l'OLSR basique. Ensuite, les résultats obtenus ont été analysés et discutés.
- Enfin, nous achèverons notre thèse par une conclusion ainsi que diverses perspectives de recherches dans cette optique.

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX SANS FIL



SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	6
1.2	LES RÉSEAUX SANS FIL	7
1.2.1	Définition	7
1.2.2	Technologie de communication sans fil	7
1.2.3	Types des réseaux sans fil	8
1.2.4	Classification des réseaux mobiles selon l'infrastructure	9
1.3	LES RÉSEAUX MOBILES AD HOC (MANET)	11
1.3.1	Définition	11
1.3.2	Historique et évolution des réseaux ad hoc mobiles	11
1.3.3	Applications des réseaux mobiles ad hoc	14
1.3.4	Présentation des réseaux Ad-Hoc mobile	16
1.3.5	Modes de communication	17
1.3.6	Contraintes liés aux réseaux Ad-Hoc	17
	CONCLUSION	18

1.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présenterons des notions sur les réseaux mobiles ad hoc . Nous présenterons aussi les contraintes liées au déploiement de tels réseaux ainsi que les défis encourus pour assurer une certaine qualité de service dans de tels réseaux. Les équipements mobiles deviennent de plus en plus petits et puissants en termes de capacité de traitement et de stockage de données. De plus, ils sont dotés d'une multitude de fonctionnalités qui permettent d'assurer différents types d'applications et de services. Parmi les applications et services offerts via un équipement mobile, figurent les services de connexions et les services de données correspondants. Ces derniers représentent le service le plus demandé par les utilisateurs mobiles. Par exemple, les connexions entre deux téléphones mobiles cellulaires sont assurées par les BSC et les MSC ; les ordinateurs portables sont connectés à Internet via des points d'accès fixes. Il y a en outre, des situations spécifiques où les besoins de connexions des utilisateurs ne sont pas assurés par le réseau dans une zone géographique donnée. Dans cette situation, fournir la connectivité est un réel défi. De nouvelles alternatives pour fournir les services ont été proposées. Elles sont basées sur le fait d'avoir des stations mobiles interconnectées les unes aux autres grâce à une configuration autonome, créant ainsi un réseau ad hoc flexible et performant. Parallèlement, le réseau ad hoc peut être utilisé pour l'extension d'un réseau filaire. Dans ce cas, les nœuds mobiles peuvent avoir accès à l'Internet à travers une passerelle, pour étendre les services de l'Internet au-delà de l'infrastructure filaire. Dans le domaine des réseaux ad hoc, les réseaux de senseurs (ou de capteurs) représentent un champ important de recherche. Un réseau de senseurs est composé d'un grand nombre de nœuds mobiles aléatoirement distribués sur le terrain à étudier, dont les tailles et les capacités sont très réduites, et dont l'objectif est de collecter les informations. Le routage ad hoc constitue la base des réseaux de senseurs. Cependant, les solutions proposées dans les réseaux ad hoc sont généralement inadaptées aux spécificités des réseaux de senseurs, vu le type d'application spécifique de ces réseaux et la fonction principale des nœuds qui est collecter l'information. De plus, les communications dans les réseaux de senseurs sont souvent à un saut et consistent à remonter l'information à une entité centrale. Historiquement, les réseaux mobiles ad hoc ont été d'abord introduits pour l'amélioration des communications dans le domaine militaire. Dans ce contexte, il n'existe pas d'infrastructure existante pour relier les communications, vue la nature dynamique des opérations et des champs militaires. Les premières applications dans les réseaux ad hoc sont apparues avec le projet PRN et (Packet Radio Network) ([Abdellaoui 2009](#)) en 1972. Ce projet a été inspiré par l'efficacité de la technologie par commutation de paquet, le partage de la bande passante, le routage *store and forward*, et ses applications dans l'environnement mobile sans fil. SURAN (Survivable Radio Networks) ([Belkheir 2015](#)) a été développé par la DARPA en 1983 pour dresser les principaux problèmes du projet PRNet dans le domaine de la scalabilité, la sécurité, la capacité de traitement et gestion d'énergie. Les objectifs étaient de proposer des algorithmes qui peuvent supporter jusqu'à une dizaine de milliers de nœuds, tout en utilisant des mécanismes radio simples, avec une faible

consommation d'énergie, et un faible coût. Ce travail a amené à la conception de la technologie LPR *Low cost Packet Radio* (Chender 2006) en 1987, dotée d'une couche radio DSSS *Direct Sequence Spread Spectrum* avec un processeur pour la commutation de paquets intégré (Intel 8086). De plus, une famille de protocoles pour la gestion du réseau a été développée, et une topologie hiérarchique du réseau basée sur un clustering dynamique est utilisée pour remédier au problème de la scalabilité. Des améliorations pour l'adaptabilité de la couche radio, la sécurité et l'augmentation de la capacité ont été proposées. L'évolution des infrastructures du réseau Internet et la révolution de la micro-informatique ont permis de rendre faisables et applicables les idées initiales des réseaux radio de paquets. Le programme GloMo (Global Mobile) (Naimi 2015) initié par la DARPA en 1994 avait comme objectif de supporter les communications multimédia n'importe quand et n'importe où à travers des équipements sans fil. Tactical Internet (TI) (Abdellaoui 2009) est l'une des implémentations des réseaux sans fil ad hoc grandeur nature développée par l'armée américaine en 1997, utilisant des débits de plusieurs dizaines de kilobits par seconde. Un autre déploiement a été réalisé en 1999, avec (Extending the Littoral Battlespace (ELB) advanced concept technology demonstration (ACTD)) (Sesay et al. 2004) qui permet de démontrer la faisabilité de concepts militaires pour les communications des bateaux en mer aux soldats sur la terre par l'intermédiaire d'un relais aérien. 20 nœuds dans le réseau ont été considérés.

Dans la suite de ce chapitre nous allons aborder le concept des réseaux Ad-hoc. Quelques domaines d'application seront étalés démontrant ainsi les différentes contraintes liées au déploiement de tels réseaux.

1.2 LES RÉSEAUX SANS FIL

1.2.1 Définition

Un réseau sans fil de l'anglais *Wireless Network* est un réseau qui interconnecte plusieurs terminaux (ordinateur, capteur, téléphone smart, etc.) qui peuvent communiquer sans liaison filaire. Ce genre de réseaux a été conçu essentiellement; afin de pouvoir mettre en place assez rapidement un réseau de communication et sans avoir besoin préalablement une infrastructure; et dans le but est d'assurer une liaison indépendante de l'emplacement des entités qui constituent le réseau en utilisant une technologie sans fil tel que les plus connus la technologie radio, infrarouge et Bluetooth. Mais cependant, il faut souligner important que ce genre de liaison nécessite des protocoles de communication spéciale conçu pour remédier au problème de mobilité mais aussi pour adapter au nouveau medium de communication (Pujolle 2014).

1.2.2 Technologie de communication sans fil

Afin d'acheminer les données dans un réseau et les faire circuler entre les nœuds, un support physique appelé généralement le médium doit être utilisé sous une de ses formes, soit de nature filaire en utilisant des matières tel que le cuivre et plus récemment la fibre optique. Soit de nature

sans fil, tout en utilisant, comme précédemment cité une de la technologie infrarouge ou bien radios :

- L'infrarouge est une technologie simple et peu coûteuse utilisée pour des communications à petite portée tout en assurant un débit élevé, elle se caractérise aussi par une plage fréquentiel lui donnant une capacité de franchir les obstacles transparent comme le verre, toutefois, elle peut pas franchir les obstacles opaques comme le cas d'un mur, ceci les rendre utilisable seulement à une petite échelle à l'ordre d'une pièce par exemple ;
- Liaisons radio est une technologie basée sur l'utilisation des ondes électromagnétiques ayant la même nature que la lumière, c'est à dire des perturbations des champs électrique et magnétique. La fréquence utilisée de ces liaisons dans le domaine des réseaux sans fil est à peu près égale à 2.4 GHZ.

La technologie de communication sans fil, qui ne nécessite pas de câble, et selon la fréquence utilisée, ainsi que le débit supporté et la portée que peut atteindre une transmission, donne naissance à plusieurs types de réseau. Le principe est d'utiliser des ondes électromagnétique pour émettre les données ces ondes se propage et peuvent être capté par les antennes des autres nœuds dans la zone de couverture cette technologie a un inconvénient de fiabilité moindre par rapport au médium filaire (Fabrice 2009)

1.2.3 Types des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil sont catégorisés selon la zone de couverture qu'ils peuvent couvrir ,généralement, en quatre types (Kacimi 2009).

- **Réseaux personnels sans fil (WPAN) :** Un réseau personnel sans fil noté WPAN pour Wireless Personal Area Network est un réseau à faible portée qui ne dépasse pas une dizaine de mètres. Ainsi, plusieurs technologies sont utilisés pour le réaliser tel que le Bluetooth, l'infrarouge et Zigbee. Ce type de réseau est utilisé pour relier un équipement à l'ensemble de ses périphériques ou même pour relier plusieurs équipements peut distant.
- **Réseaux locaux sans fil (WLAN) :** Un réseau local sans fil WLAN pour Wireless Local Area Network peut couvrir une portée qui peut atteindre une centaine de mètres, à titre d'exemple un réseau local d'entreprise. Ce réseau permet de connecter deux terminaux présents dans sa zone de couverture en utilisant divers technologies à savoir le WiFi ou IEEE 802.11 et hyperLAN2 .
- **Réseaux métropolitains sans fil (WMAN) :** Ce réseau connu sous l'appellation soit métropolitain sans fil WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) ou bien boucle locale radio WLL (Wireless local loop) était, initialement conçu pour interconnecter des zones géographiquement difficilement accessible. Les WMAN sont fondés sur la norme IEEE 802.16, dont la WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est la technologie sans fil la plus prometteuse qui permet d'obtenir des débits de l'ordre 70 Mbit/s et une couverture de plusieurs kilomètres .

— **Réseaux étendus sans fil (WWAN) :**

Ce réseau étendu (si comparé avec leur précédents) et sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network) est aussi appelé réseau cellulaire mobile, c'est les réseaux sans fil utilisé, sans rivale, dans le domaine de la téléphonie mobiles et permet ainsi de crée un réseau sans fil de couverture théoriquement illimité à l'aide de différentes technologies : GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). (Belkheir 2015; Naimi 2015).

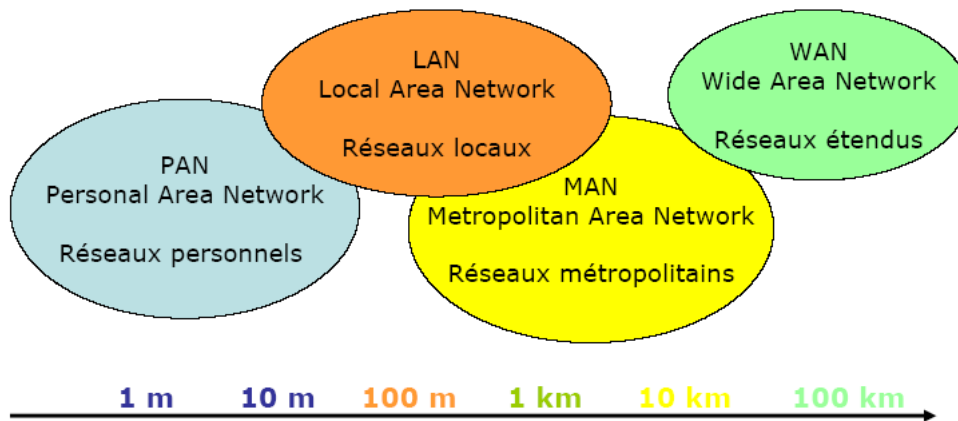


FIGURE 1.1 – Classification des réseaux sans fil

1.2.4 Classification des réseaux mobiles selon l’infrastructure

Les réseaux mobiles peuvent être classifiés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure le tableau suivant représente quelques technologies qui existent dans le mode sans fil.(SEBAHI 2013)

Categorie	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Standard	IEEE 802.15	802.11	802.16	802.20
Technologie	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Couverture	Quelques dizaines de mètres	Une centaine de mètres	Quelques dizaines de Kilomètres	Une centaine de kilomètres
Débit	<1Mbps	2 a 54 Mbps	Jusqu'à 70 Mbps	10 à 385 Kbps
Applications	Point à point	Réseau Entreprise	Fixe ,accès au dernier Kilo-mètre	GSM PDA

TABLE 1.1 – Comparaison entre les réseaux sans fil

- **Les réseaux mobiles avec infrastructure :** Dans ce type de réseaux sans fil l'interconnexion entre les nœuds est assurée à l'aide des stations de base qui prennent en charge l'établissement de connexion entre les nœuds qui se trouvent dans leur zone de couverture appelée aussi cellule comme illustré sur la figure 1.2. A l'intérieur d'une cellule les nœuds peuvent s'échanger des messages. Les stations de base peuvent être reliées généralement par une liaison filaire mais peut être aussi sans fil

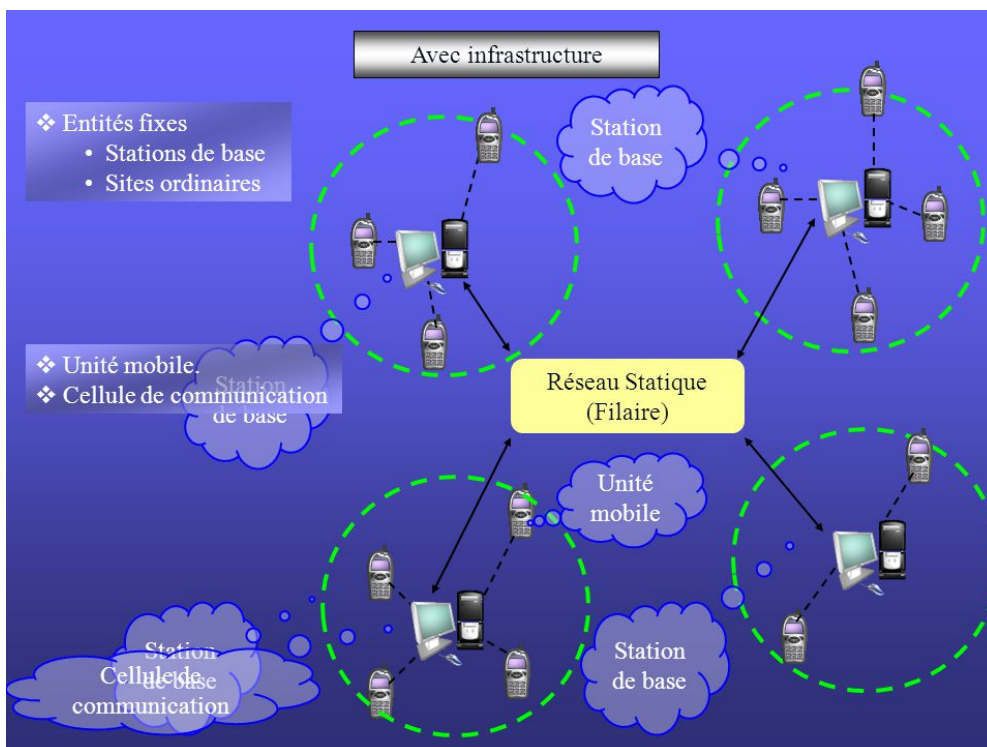


FIGURE 1.2 – Exemple de mode infrastructure

- **Les réseaux mobiles sans infrastructure** : Dans ce type appelé aussi mode Ad hoc les nœuds sont mobiles et communiquent entre eux directement sans faire appel à un point d'accès chaque nœud peut communiquer avec les autres nœuds qui se trouvent dans sa zone de couverture, chaque nœud peut jouer le rôle d'un router afin d'acheminer les messages des autres nœuds vers des destinations qui peuvent pas atteindre directement et qui ne se trouvent pas directement dans leur zone de couverture ([Ahizoune 2011](#))

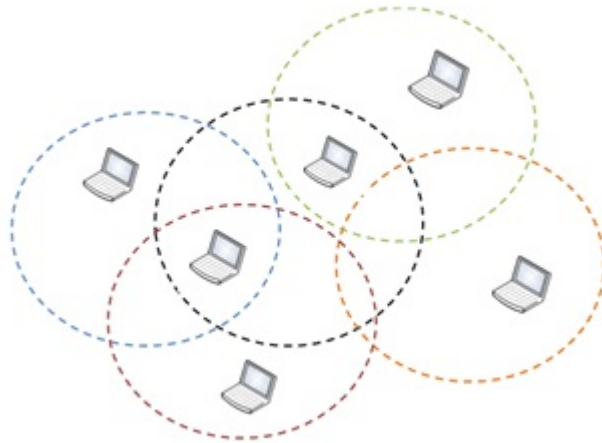


FIGURE 1.3 – Exemple de mode ad Hoc.

1.3 LES RÉSEAUX MOBILES AD HOC (MANET)

1.3.1 Définition

Un réseau Manet est un ensemble de nœuds mobiles reliés entre eux par des connexions sans fil et dont la gestion de la communication s'effectue d'une façon autonome sans administration centralisée. Le fait que les nœuds sans en perpétuel mouvement rend la topologie du réseau dynamique. On peut trouver les Manet dans différents domaines à cause de la facilité de leur mise en œuvre. La communication ce fait en mode point par point de façon à ce que chaque nœud communique avec tous les nœuds qui se trouvent dans sa portée, on peut rejoindre aussi un nœud hors la zone de couverture en utilisant les nœuds intermédiaires. Dans ce cas la chaque nœud peut jouer le rôle d'un routeur et participe dans la découverte et la maintenance des routes([Meraihi 2010](#)).

1.3.2 Historique et évolution des réseaux ad hoc mobiles

Les réseaux mobiles ad hoc on était développés initialement pour des besoins militaires comme un outil de communication conçus afin de se mettre en fonctionnement rapidement et dans n'importe qu'elle situation même les plus difficiles, les premiers travaux ont commencé depuis les années 60 dans le cadre du projet DARPA (Defence Advanced Research Project Agency) ([Khalidoun Al Agha 2001](#)), le but était de développer des réseaux robustes avec une infrastructure qui continue de travailler en cas

de pannes ou d'attaques. Dans de telle situation ce n'est pas possible de faire appel à un réseau avec infrastructure puisque vu la nécessité d'installer des points d'accès au préalable chose qui est difficile voire impossible dans des situations de danger (un champ de bataille, opération de sauvetage...) en plus de l'influence de la panne de ces points d'accès d'où vient l'idée de développer un autre type de réseaux qui repose sur un mode de fonctionnement plus robuste. Suite à ces besoins le département de la défense américaine a financé plusieurs projets de recherche commençant par le programme de recherche PRNet (*Packets Radio Network*). Le but principal de ces projets était de traiter la problématique de routage et l'accès au média dans un réseau de communication multi-sauts par onde radio qui a été lancé en 1972. Ensuite un deuxième projet a été lancé en 1983 le programme SURAN (*SURvivable RADio Networks*) qui traite en premier lieu la problématique de la sécurité, la gestion d'énergie et la capacité de traitement. L'objectif était le développement de nouveaux algorithmes de routage capable d'augmenter le nombre de nœuds supportés par PRNet dans une zone géographique étendue et réduire la consommation d'énergie. Le LPR (*Low-cost Packet Radio*) a été le fruit de ces recherches en 1987. La technologie LPR permet la commutation de paquets et donne une amélioration aux niveaux de la sécurité et la gestion de la consommation de l'énergie par les nœuds.

Les réseaux sans fil commencent à faire partie des équipements d'un ordinateur portable à partir des années 1990 ce qui a permis la communication directe et sans intermédiaire entre ces ordinateurs portables. L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a adopté le terme « réseaux Ad-Hoc » pour le standard 802.11 des réseaux locaux sans fil.

Suite aux succès du réseau sans-fil, en 1994, le DARPA sponsorisait les programmes GloMo (*Global Mobile Information Systems*) et NTDR (*Near-term Digital Radio*). Ces programmes avaient pour but le développement des réseaux Ad-Hoc sans fil qui offraient un environnement de communication multimédia n'importe quand et n'importe où (Leiner, Rutherford et Sastry, 1996). Le NTDR est encore utilisé actuellement par l'armée américaine.

Un certain nombre de standards ont suivi ce développement des réseaux Ad-Hoc. C'est ainsi que le groupe de travail MANET (*Mobile Ad-Hoc Networks*) a été fondé au sein de l'IETF (*The Internet Engineering Task Force*). Ce groupe avait pour but d'essayer de standardiser les protocoles de routage dans les réseaux Ad-Hoc (Corson et Macker, 1999).

Plusieurs applications militaires et civiles ont suivi, par la suite, cette émergence des réseaux Ad-Hoc (Abdellaoui 2009). Le terme ad hoc signifie spécialement institué pour un objet précis auquel il convient parfaitement selon le Trésor de la Langue Française informatisé (TLFi), un réseau Ad hoc aussi appelés MANET (pour *Mobile Ad hoc Network*) désigne en fait un réseau constitué de nœuds de plusieurs types qui peuvent être des ordinateurs portables, des téléphones cellulaires, des PDAs, des capteurs, des instruments de mesures, qui peuvent avoir des caractéristiques matérielles et logicielles différentes (débit de transmission, mémoire, batterie, unité centrale, etc.). Communiquant entre eux par des ondes radio dont la fréquence est le plus souvent de l'ordre du gigahertz en utilisant différentes technologies sans fil, on parle alors de liaisons sans fil ou Wireless.

Les terminaux constituant ce type de réseau sont appelés terminaux ad hoc ou nœud ad hoc. Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans infrastructure, ça veut dire qui ne nécessite ni un routeur pour acheminer le trafic d'une source vers une destination, ni une entité centrale pour l'administrer comme il est le cas dans les réseaux filaires ou cellulaires. Les nœuds sont aptes à créer un réseau ad hoc et à s'organiser dynamiquement quand plusieurs équipements se trouvent à portée radio les uns des autres. Ces nœuds sont dotés d'une ou plusieurs interfaces réseau permettant une communication sans-fil en utilisant plusieurs technologies telle que le Bluetooth, le WIFI ou le WIMAX selon la portée désirée. Chaque interface utilise une antenne qui permet la réception ou l'émission des signaux permettant ainsi une diffusion dans le voisinage et de mettre en œuvre des liaisons point à point. Lorsque deux nœuds ne sont pas en portée directe i.e. ils ne peuvent pas communiquer directement entre eux. Ils peuvent acheminer leur paquets lors d'une communication via d'autre nœud sous forme de communication point à point de la source jusqu'à arriver à la destination. Cette politique appliquée dans le cœur du réseau ad hoc où le nœud peut joué le rôle d'un routeur en cheminant les paquets d'autre nœud comme il peut envoyer ou recevoir ces propres paquets. Les nœuds utilisent leurs voisins immédiats afin de faire suivre leurs communications. Les nœuds commencent par découvrir leur voisinage (les nœuds qui sont à l'intérieur de leur zone de couverture) et à chaque fois que l'un d'entre eux souhaite communiquer, il envoie son message à ses voisins qui à leur tour l'envoient à leurs voisins et ainsi de suite. Un des avantages des réseaux ad hoc est la mise en place rapide d'un réseau de communication dans une zone qui subit une catastrophe ou qui n'a pas une infrastructure, comme dans le cas des opérations de sauvetage dans les zones sinistrées où on a besoin de mettre en place, rapidement, un réseau de communication pour coordonner les recherches et les informations logistiques. Une des principales caractéristiques de ces réseaux est que les nœuds sont mobiles, et qu'ils peuvent rejoindre ou quitter le réseau de façon dynamique on parle donc d'un réseau Ad hoc mobiles. La figure 1.4 montre une topologie d'un réseau ad hoc où les nœuds sont de différentes natures et il n'existe aucune unité centrale qui gère la communication ([Abdellaoui 2009](#))



FIGURE 1.4 – Architecture d'un réseau ad-hoc

1.3.3 Applications des réseaux mobiles ad hoc

Les MANET sont utilisés pour déploiement d'une infrastructure lorsque la création d'un réseau filaire est coûteuse, difficile ou dangereuse, ils ont été développés, en premier lieu, pour les communications dans le domaine militaire et petit à petit c'est réseaux en pénétré dans différents domaines. On peut citer quelques applications où se trouvent des réseaux purement ou partiellement ad hoc (Maheswara & Naik 2013; Corson & Macker 1999).

- Les interventions de sauvetage, opérations de recherche, de secourisme lors d'un désastre (feux, inondation, séisme).
- Le domaine de la domotique : les logements personnels sont devenus de plus en plus intelligents et confortables grâce à leur capacité de s'adapter aux comportements des utilisateurs, à l'aide des différents capteurs qui peuvent être installés facilement et sans câblage
- Le domaine militaire est parmi les premiers domaines qui ont utilisé la technologie Ad hoc ou les nœuds mobiles peuvent être des véhicules des soldats, des avions ou bien des hélicoptères. Ces nœuds peuvent être soit mobiles sur un champ de bataille, soit sous la forme des capteurs implémentés dans des zones dangereuses. Ces derniers sont utilisés pour récolter les différentes données et informations.
- Réseaux de capteurs WSN utilisés dans le domaine environnementale afin de collecter les données météorologiques ou suivie des différents phénomènes naturels (les tsunamis, les feux de forêts, la pollution, le climat, les activités sismiques, etc.) Sur des zones vastes et pour une longue durée les capteurs peuvent être de différents types et fournies des informations et mesurés différents métriques le faible coût de ces dispositifs rend ce type de réseau de plus en plus utilisés. Un autre exemple d'application est dans le domaine commercial est la possibilité de recueillir des données fournies par des étiquettes intelligentes RFID par l'intermédiaire de communi-

- cations Ad-Hoc (utiliser par les transporteurs pour garantir la traçabilité des marchandises).
- VANET (Vehicular Ad hoc Networks) dans ce type de réseaux les nœuds mobiles représente des véhicules soit dans un milieu urbain ou des autoroutes plus des nœuds fixes qui s'appelle les RSUs (Roadside Units) l'échange des différents types d'informations en temps réel par exemple, (l'état du trafic, la gestion de distance de sécurité entre les voitures, etc) rend les systèmes routiers intelligent et la communication peut être pour permettre l'échange de données sur le réseau Chaque véhicule agit en tant que récepteur, émetteur et routeur. Deux types de communication peuvent être définis : les communications de véhicule à véhicule (V2V) et de véhicule à infrastructure (V2I). Les véhicules et les RSUs utilisent une connexion sans fil pendant V2V communications V2I, tandis que les RSU communiquent généralement entre eux via une connexion filaire qui permet plus de sécurisé et de performance (Diab *et al.* 2019).
 - Applications commerciales utilisés pour un paiement électronique distant (taxi, boutiques) ou pour un accès Internet mobile, etc. véhicules communicants (Vehicular Ad hoc NETWORKS (VANET)) présente un exemple de ce type. VANET est un groupe de véhicules à portée les uns des autres formant des systèmes de transports intelligents. L'intérêt optimal des VANET est de contribuer à des routes plus sûres et plus efficaces dans le futur en fournissant des informations opportunes aux conducteurs et aux autorités intéressées. (Chenxi *et al.* 2002)
 - Les réseaux Ad-Hoc ont trouvé leur place dans les réseaux de capteurs (Wireless Sensor Networks). Ce type de réseau a plusieurs applications dans les domaines commercial et environnemental (réseaux de capteurs pour observer les tsunamis, les feux de forêts, la pollution, le climat, les activités sismiques, etc) (Senouci & Guy 2002). Un exemple dans le domaine commercial est la possibilité de recueillir des données fournies par des étiquettes intelligentes RFID par l'intermédiaire de communications Ad-Hoc (utiliser par les transporteurs pour garantir la traçabilité des marchandises).
 - Les réseaux mobiles sans fil Ad-Hoc pourraient être utilisés pour simplifier l'intercommunication et le partage des applications entre plusieurs équipements mobiles (PDA, ordinateur portable, téléphone cellulaire ou autres) dans une zone limitée qu'on appelle Personal Area Network (PAN). Ce principe a offert des nouvelles perspectives pour les jeux en réseau. En effet, Sony a offert le premier modèle de console de jeu portable PSP permettant le jeu en réseau (jusqu'à 16 consoles) grâce à la technologie Ad hoc (Sony, 2008). Ainsi, avec l'émergence que prennent les appareils mobiles, PAN est très prometteur pour MANET. Les réseaux Ad-Hoc offrent une solution à faible coût pour étendre la couverture des points d'accès Internet et des réseaux sans fil (UMTS, WiMax). Par exemple, les passagers d'un train auraient l'accès à Internet grâce à des points d'accès installés dans chaque wagon. Ces points d'accès seraient reliés entre eux et connectés à Internet par la suite

via une connexion Ad-Hoc à des passerelles dans les gares. Ce genre de solution a été offert par une société anglaise NOW Wireless (NowWireless, 2008). Elle commercialise d'autres applications très intéressantes de la technologie Ad-Hoc : Feux de signalisation, services de pompier et police, transport intelligent, solutions pour le réseautage domestique, télématiques et solutions de réseaux de capteurs. Ces solutions sont déployées dans plusieurs villes (Coventry, Glasgow).



FIGURE 1.5 – Exemple d'application des réseaux ad hoc

1.3.4 Présentation des réseaux Ad-Hoc mobile

Un réseau ad-hoc étant constitué d'un ensemble de nœuds connectés entre eux cette connexion est une relation entre les deux nœuds qui appartient au réseau vu cette description un réseau ad-hoc peut être représenté sous forme d'un graphe $R=(n_i, l_i)$ ou n_i est l'ensemble des nœuds et l_i est l'ensemble des lien x,y deux nœud appartient à R si $(x,y) \in n_i$ alors il existe une connexion symétrique entre ces deux nœuds la structure du réseaux est en perpétuelle changement vu la mobilité des nœuds et la disparition d'autre nœuds à cause de l'épuisement de leurs énergies donc la topologie elle est dynamique voici un exemple d'une modélisation d'un réseau qui contient 7 nœuds mobiles sous forme d'un graphe . (chender 2006)

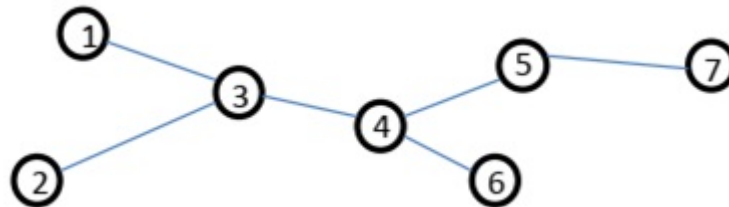


FIGURE 1.6 – exemple de modélisation d'un réseau ad hoc

A cause de la mobilité des nœuds, la topologiques du réseau est dynamique. Puisque la mobilité influence sur les liens entre les différents nœuds. En effet, la perte des liaisons radio est très habituelle et imprévisible dans ce type de réseau. A cette effet une représentation de la to-

pologie est liée à un instant T et peut être différente partiellement ou totalement à l'instant $T + \delta t$ (Mounir 2010)

1.3.5 Modes de communication

La transmission de données dans les réseaux Ad hoc peuvent être établis selon différents modes (Goyal *et al.* 2011)

- le mode unicast ou point à point dans ce cas une source communique avec une seule destination
- le mode multicast ou multipoint ou une station source peut communiquer avec plusieurs destinations à la fois
- Le mode Broadcast ou diffusion dans lequel un message est transmis à l'ensemble des nœud du réseau

1.3.6 Contraintes liés aux réseaux Ad-Hoc

Les réseaux Ad-hoc ont typiquement les mêmes difficultés techniques que nous pouvons trouver dans les réseaux sans fil en générale en plus s'ajoutent de nouvelles contraintes spécifiques aux réseaux ad-hoc on peut citer les principaux problèmes de ces réseaux Ad-hoc (AIT-SALEM 2011b)

- **Interférence des ondes hertziennes :**
Chaque appareil sans fil utilise une fréquence radio donnée mais vu le nombre des nœuds sans fil l'utilisation d'une même fréquence ou des fréquences proches engendre une perturbation de la communication et influence leur qualité
- **Taux d'erreurs :** La nature de la transmission sans fil basée sur l'utilisation des ondes radio génère un taux d'erreur plus important par rapport à l'utilisation d'un support filaire
- **Débit limité :** Augmentation de débit et toujours un grand défi dans le domaine du sans-fil ce qui impose une contrainte pour certaines applications gourmandes en bande passante comme le streaming par exemple
- **La portée :**
La distance qui peut atteindre un signal radio est liée directement par sa puissance de signal chose qui n'est pas toujours garantie surtout dans le cas d'utilisation des équipements moins performants comme dans les cas des capteurs.
- **Autonomie :** la source d'énergie d'un nœud dans un réseau Ad-hoc mobile est généralement limitée, hors chaque nœud peut jouer le rôle d'un routeur en transmettant des paquets d'autres nœuds, ont plus de l'énergie utilisée pour la réception des différents paquets de données ou de signalisation et l'énergie nécessaire pour sa mobilité, dans le cas où il est mobile toutes ces opérations accélèrent l'épuisement de son batterie chose qui engendre l'incapacité d'un nœud à garantir la tâche de routage ce qui rend des parties de ce réseau inaccessibles
- **Spécificité du routage :**
Dans les réseaux Ad-hoc mobile chaque nœud peut jouer le rôle d'un routeur ce qui rend les protocoles de routage filaire utilisables ce qui nécessite le développement de nouveaux protocoles prenant

en compte les cette contrainte plus la contrainte de mobilité et d'énergie limité

- **Sécurité** : Les réseaux Ad-hoc son exposé à différents type d'attaque qui utilise des Fail de sécurité qui existe principalement dans les protocoles de routage de sorte que différentes versions de ces protocoles existe dans la littérature qui propose des améliorations sur les différentes protocoles afin de remédier à un ou plusieurs types d'attaque
- **Des ressources limitées** :
Un nœud a généralement une capacité de calcul, et un espace de stockage limité chose qui faut prendre en compte lors de la conception et le développement des différents services au niveau des réseaux Ad-hoc.
- **Qualité de Service** : Les différentes contraintes spécifiques aux réseaux Ad-Hoc dont la mobilité et la capacité limité de calcule et de stockage la tâche d'assuré la qualité de service difficile a implémenté
- **La topologie dynamique** : La mobilité des nœuds ainsi que l'épuisement de leurs énergies provoque un changement à chaque fois de la topologie ce qui provoque la perte des liaisons ce qui nécessite une tache supplémentaire pour trouver de nouvel liaisons. .

CONCLUSION

Dans cette partie nous avons évoqué la notion des réseaux AHWSN, leurs domaines d'application ainsi que les contraintes liées à la conception et au déploiement de tels réseaux. Nous avons mis l'accent sur la contrainte d'énergie qui demeure l'axe principale de notre recherche dans notre thèse.

Le chapitre suivant quant à lui, évoquera les différents protocoles de routage et leurs classifications dans les réseaux Ad hoc mobiles.

PROTOCOLES DE ROUTAGE POUR LES RÉSEAUX AD-HOC

2

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	20
2.2	ROUTAGE RÉSEAUX MOBILES ADHOC	20
2.2.1	Définition	20
2.2.2	Contrainte de routage (réseaux mobiles adhoc)	21
2.2.3	Classification des protocoles de routage (réseaux mobiles adhoc)	21
2.2.4	Le protocole OLSR	31
2.3	CONCLUSION	42

2.1 INTRODUCTION

Les réseaux Ad hoc mobiles utilisent un mode multi saut dans leur communication; dans le cas d'une communication d'un nœud avec un autre nœud dont il n'est pas à sa portée directe, les paquets doivent être transmis de proche en proche jusqu'à atteindre leur destination. Dans ce cas, la gestion de l'acheminement de l'information est assurée à travers la tâche du routage qui représente un mécanisme clé pour les réseaux. Le routage assure l'établissement et le maintien des routes entre les différents nœuds des réseaux, d'où vient l'importance de développer des protocoles de routage qui assure une communication efficace, la raison pour laquelle n'importe quel réseau de communication est conçu.

Vu que les protocoles destinés pour les réseaux filaires ne sont pas adaptés pour le fonctionnement dans un environnement Ad hoc mobile, faute de plusieurs contraintes telles que la mobilité et le mode de communication sans infrastructure. Plusieurs protocoles de routages ont été développés, récemment, afin d'assurer la communication dans ce type de réseau et de prendre en charge toutes leurs contraintes. Ces nouveaux protocoles sont totalement distribués au point qu'aucune entité dans le réseau ne doit centraliser la communication. Dans ce chapitre plusieurs protocoles de routage Ad hoc vont être présentés ainsi que leurs différentes classifications (proactifs, réactifs, hybrides, et géographique), tout en évoquant en détail, le protocole OLSR qui demeure l'objectif principal de notre recherche.

2.2 ROUTAGE RÉSEAUX MOBILES ADHOC

2.2.1 Définition

Le routage est la tâche principale assurée dans un réseau de communication, que ce soit de type avec ou sans fil ou infrastructure. Le routage a pour rôle à la fois d'assurer, de la meilleure façon, une communication entre une source et une destination, à la fois d'établir et de maintenir des routes optimales entre les différents nœuds. Une route optimale peut être choisie selon différents critères; les protocoles de routage classique prennent en compte les routes les plus courtes en nombre de sauts comme métrique de choix entre les différentes routes; d'autres protocoles prennent en considération d'autre critère dans le but d'assurer une qualité de service; d'autres protocoles s'appuient principalement sur des critères de sécurité et de fiabilité lors du choix d'une route optimal.

Le cas des réseaux Ad hoc mobiles est plus compliqué que celui des réseaux filaires, les protocoles de routage doivent prendre en considération le paramètre de mobilité et de la non-stabilité de la topologie du réseau. Ce qui impose des contraintes supplémentaires d'où la nécessité du développement de nouveaux protocoles. Aussi, les nœuds de ce type de réseaux peuvent jouer le rôle des nœuds spéciaux confiants et sécurisés (routeurs), ce qui ajoute un autre souci de sécurité qui doit être pris en compte.

En effet, ces contraintes liées à la mobilité, la limitation de ressources (bande passante, mémoire, processeur, contraintes d'énergie) et l'absence d'une entité de confiance, ont obligés les chercheurs à concevoir des proto-

coles de routage dédiés pour les réseaux Ad hoc mobiles, essentiellement, pour assurer des routes optimales, correctes et efficaces garantissant la connexion à n'importe quel moment et entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau. Cette stratégie doit prendre en considération certaines caractéristiques (les changements de la topologie du réseau, la bande passante, le nombre de liens et la limitation d'énergie, etc.) (Ali & Sai Kumar 2008; Meraihi 2010).

2.2.2 Contrainte de routage (réseaux mobiles adhoc)

La nature des réseaux Ad hoc mobiles a imposé plusieurs contraintes, principalement, liées à :

- **la bande passante limitée** : ceci à cause de la technologie radio utilisée afin d'établir les liens sans fil. Cette contrainte exige au protocole de routage de minimiser le trafic de signalisation overhead nécessaire pour l'établissement et le maintien des routes.
- **La nature des liens** : qui peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels à cause de la différence de portée entre les différents nœuds.
- **La topologie du réseau** : de nature dynamique dû à la mobilité des nœuds et qui peut rendre les routes invalides lors de la transmission des données, et par conséquent, ceci nécessite un mécanisme de maintien des routes afin de minimiser les échecs de transmission.
- **Les ressources matérielles limitées des nœuds du réseau** : chose qui impose que les algorithmes de calcul et la mise à jour des routes soient optimaux en termes de calcul et de capacité mémoire.
- **L'absence d'infrastructure centralisée** : ce qui impose que chaque nœud puissent jouer le rôle d'un routeur et fait appelle a des mécanismes de routage distribué.

2.2.3 Classification des protocoles de routage (réseaux mobiles adhoc)

Plusieurs classifications peuvent être envisagées pour les protocoles de routage destinés aux réseaux Ad hoc mobiles ; selon l'architecture on trouve un protocole de routage uniforme et l'autre non uniforme ; selon la méthode de maintien des routes, quant à elle, on dénombre un protocole de routage proactif, soit réactif, soit hybride ou bien géographique ; et selon leur type d'algorithme de routage on trouve un protocole de routage à Vecteur distance ou l'autre à état de lien.

2.2.3.1 Protocole uniforme

Ce type de protocole est aussi nommé protocole à plat ; où tous les nœuds sont identiques et peuvent assurer les mêmes tâches du fait qu'aucune hiérarchie n'est appliquée et n'importe qu'elle nœud peut recevoir les paquets de routage et de contrôle. La désignation d'un nœud comme routeur peut être faite en se basant sur sa position et le nombre de liens qu'il détient (Fig 2.1).

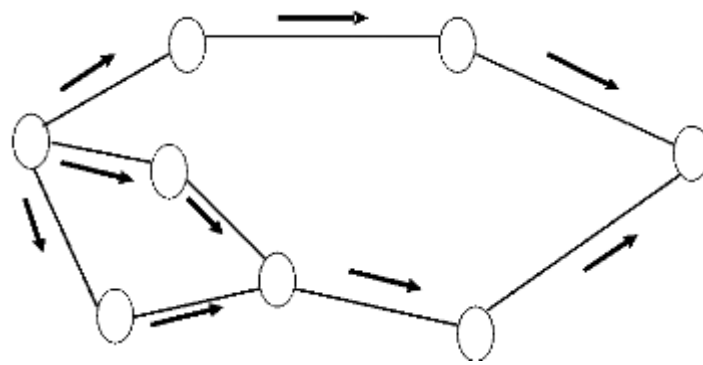


FIGURE 2.1 – Protocole de routage à plat

2.2.3.2 Protocole hiérarchique (Al-Karaki & Kamal 2004)

Dans de ce type de protocole, les nœuds peuvent avoir des rôles différents en choisissant seulement quelques nœuds jouant le rôle de routeur dans le but de réduire la complexité de routage qui se fait de passerelle à passerelle. Ceci génère une structure hiérarchique et fonctionnelle contenant plusieurs niveaux topologiques selon les fonctions de chaque groupe de nœuds sélectionnés pour réaliser certaines tâches de routage, ceci selon certains critères qui dépendent de l'objectif voulu. A titre d'exemple le «LEACH» (Akkaya & Younis 2005)] LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée, dans cet algorithme, est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusterheads locaux comme passerelles pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les clusterhead plutôt que par tous les nœuds de capteurs.

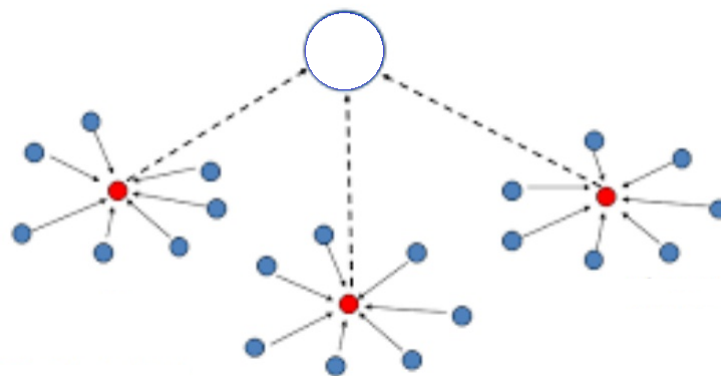


FIGURE 2.2 – Routage Hiérarchique

2.2.3.3 Protocole proactif

Concernant cette classe de protocole de routage qui est caractérisé par l'établissement et la maintenance périodique des routes utilisées afin d'acheminer les paquets de données, chaque nœud sauvegarde dans sa

table de routage les informations qui permettent d'atteindre les autres nœuds du réseau. Dans le cas des protocoles proactifs, la création et la maintenance des routes se fait d'une manière périodique afin de garder une vision réelle du réseau. A chaque changement de topologie du réseau, les nœuds transmettent des messages aux autres nœuds du réseau afin qu'ils puissent mettre à jour leurs informations de routage et de garder une vue réelle du réseau. Il est à noter qu'il existe plusieurs mécanismes pour informer les autres nœuds d'un changement dans la topologie pour maintenir l'information de routage à jour et valable . plusieurs protocole utilisant cette méthode existent dans le monde des réseaux adhoc(Mohapatra & Krishnamurthy 2004; Brahma 2006), d'où on peut citer les plus connu, à l'instar de : l'OLSR(Optimized Link State Routing Protocol) (Clausen *et al.* 2003), le FSR (Fish-eye State Routing)(Pei *et al.* 2000) DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector) (Adibi & Erfani 2006), le GSR (Global State Routing)(Chen & Gerla 1998), le CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing)(Chiang *et al.* 1997) , et le WRP (Wireless Routing Protocol) (Vijay *et al.* 2009)

2.2.3.4 Protocole réactif

Ce type de protocole est caractérisé par le faite que la mise à jour des informations de routages se fait à la demande, cela, et lorsqu'un nœud veut envoyer des paquets de données à un nœud de destination.

Contrairement au protocole réactif, où la mise à jour des table de routage s'effectue d'une manière périodique n'est pas faite (Saddiki 2019). La majorité des protocoles de routage récemment proposés appartiennent à cette classe (Frikha 2010) . Dans cette classe, lorsqu'un noeud désire communiquer un mécanisme de découvert de routes est déclenché. Une fois l'information sur la route voulue est récupérée elle sera utilisée jusqu'à ce qu'elle ne sera pas valable à cause du changement de la topologie, dans ce cas une nouvelle découverte de route est déclenchée. Il existe plusieurs protocoles qui appartient à ce type, tel que : l'AODV (Ad hoc on demand Distance Vector)(Royer & Perkins 1999) , le TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)(Park & Corson 1997); et le DSR (Dynamic Source Routing)(Johnson *et al.* 2007; Ouakil 2002).

2.2.3.5 Protocole hybride

Comme son nom l'indique, cette classe de protocole emploie les deux méthodes précitées, à savoir : proactif est réactive. Une stratégie d'optimisation met en œuvre ces deux dernières approches totalement différentes pour deviser le réseau en deux zones et appliquer une politique pour chaque zone. L'approche proactive est appliquée sur le voisinage proche à une distance d prédéfinie , classée en première zone. Le reste des nœuds qui sont classés dans la deuxième zone, cas d'établissement de lien avec un nœud qui appartient à cette dernière, une politique réactive sera utilisée. Il est de grande importance de noter que cette technique est bien adaptée aux réseaux à grande échelle, puisqu'elle cumule les qualités des deux approches. Mais néanmoins, elle englobe les points faibles des deux types de protocoles; à savoir les messages overhead à

cause de l'envoi des messages périodique ainsi que le cout d'établissement d'une nouvelle route par l'approche réactive (Mounir 2010). Plusieurs protocoles appartiennent à cette classe, à titre exemples : le CBRP (*Cluster Based Routing Protocol*)(Karp & Kung 2000) , le ZRP (*Zone Routing Protocol*)(Haas & Pearlman 2001) , et le ZHLS (*Zone-based Hierarchical Link State Routing Protocol*)(Joa-Ng & Lu 1999).

2.2.3.6 Protocole de routage géographique

Ce type de protocole est caractérisé par l'utilisation de la position géographique des nœuds dans le processus de routage afin d'optimiser les routes, ce qui nécessite la dotation des nœuds par système de géolocalisation qui peut fournir la position du nœud à l'instant t. Le système de géolocalisation le plus utilisé est le GPS (*Global Positioning System*). Mais puisque ce dernier présente une cherté d'équipements et consomme énormément d'énergie, il existe d'autres techniques pour déterminer la position géographique d'un nœud, où une fraction des nœuds sont utilisés comme ancres (équipées de GPS) afin de permettre à d'autres nœuds de déterminer leurs positions. Les autres nœuds déterminent leurs positions à travers les méthodes géométriques utilisant plusieurs paramètres, comme la puissance du signal (Boushaba 2007) . La détermination de la position d'un nœud sert à orienter les paquets à la destination de ce dernier à travers un chemin optimisé(Mounir 2010). Il existe plusieurs protocoles qui utilisent cette technique à savoir : le GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*)(Karp & Kung 2000) ; le DREAM (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*)(Basagni *et al.* 1998) et le LAR (*Location-Aided Routing*)(Ko & Vaidya 2000). Le protocole « MECN » (Rodoplu & Meng 1999) *Minimum Energy Communication Network* est un protocole de routage qui cherche à établir et à entretenir une énergie minimale pour les réseaux sans fil en utilisant des GPS de faible puissance. Le MECN utilise une station de base comme destination de l'information, ce qui est toujours le cas pour les réseaux de capteurs.

Le MECN identifie une région de relais pour chaque nœud. La région de relais se compose de nœuds dans une zone périphérique où la transmission à travers ces nœuds est plus économe en énergie que la transmission directe. L'idée principale de MECN est de trouver un sous-réseau qui a moins de nœuds et qui nécessite moins d'énergie pour la transmission entre deux nœuds quelconques. Cela est effectué en utilisant une recherche localisée pour chaque nœud, en prenant en considération sa région de relais.

2.2.3.7 Protocole à état de lien

De l'anglais *Link State Protocols* ; dans ce type d'algorithme, les nœuds du réseau envoient des paquets périodiques contenant les informations sur leur (voisinage), ceci afin de maintenir une vision globale et à jour de la topologie du réseau. Ces paquets de signalisation doivent être envoyés, même, en cas de changement dans les états de lien afin de prévenir les autres nœuds. Cette stratégie permet, en cas d'échec d'envoi par une route, de basculer rapidement vers d'autres routes, ce qui donne une tolérance à cette approche, mais cependant, cela nécessite la sauvegarde et

l'échange d'une quantité d'information assez importante surtout dans le cas des réseaux à grande densité. Les informations sur les états des liens disponibles sont utilisées afin de calculer les routes les plus courtes à l'aide de l'algorithme de Dijkstra (Mohapatra & Krishnamurthy 2004).

2.2.3.8 Protocole à vecteur de distance

À propos de ce type de protocole, les nœuds interchangent les informations concernant la distance les séparant des autres nœuds du réseau, ainsi à partir des informations reçues des autres nœuds, on peut calculer les chemins les plus courts vers les différents nœuds du réseau. Ce calcul est à refaire s'il y'a des changements dans les informations de distances minimales séparant deux nœuds. Le calcul de routes est réalisé en utilisant l'algorithme de bellman-ford (Mohapatra & Krishnamurthy 2004). La figure schématise la classification des différents protocoles de routage

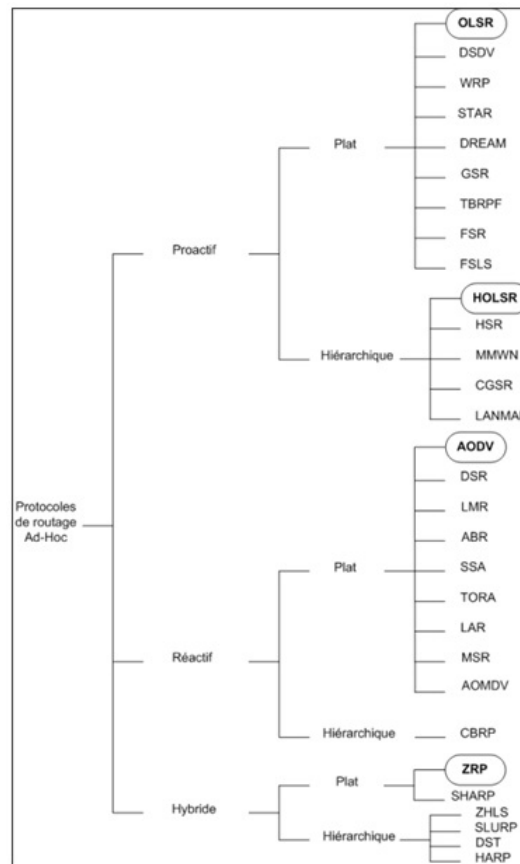


FIGURE 2.3 – Classification des protocoles de routage

2.2.3.9 Fonctionnement protocoles de routage (réseaux Ad hoc mobiles)

Dans ce qui suit, une description du fonctionnement de quelques protocoles de routage très répandus dans les réseaux Ad hoc mobiles.

2.2.3.9.1 DSDV : Le protocole DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Protocol) est une adaptation du protocole RIP (Routing Information Pro-

to) aux réseaux Ad hoc mobiles. Les concepteurs de ce protocole ont rajouté un nouvel attribut (le numéro de séquence) aux entrées de la table de routage qui permet à chaque nœud de distinguer entre les anciennes et nouvelles routes et ainsi éviter la formation des boucles de routage. Dans le DSDV, la structure d'une ligne de la table de routage est définie comme suit : <Destination, Nœud suivant, Nombre de sauts, Numéro de séquence>. Afin de maintenir la cohérence des tables de routage, chaque nœud diffuse périodiquement ou lors d'un changement de topologie des paquets de mise à jour (tables de routage) à ses voisins. À la réception par un nœud d'un paquet de mise à jour, il compare cette information à celles qui existent déjà dans sa table de routage et transmet à son tour un paquet de mise à jour à ses voisins. Si plusieurs paquets de mise à jour sont reçus par un nœud avec des numéros de séquences différents pour la même destination, alors la route ayant le plus grand numéro de séquence est sélectionnée. Par contre, si ces paquets de mises à jour ont le même numéro de séquence, alors c'est la route avec la distance (nombre de sauts) la plus courte qui est choisie. En plus d'être lent à converger, le protocole DSDV génère un surcoût considérable en termes de communication ($O(n^2)$ pour un réseau de n nœuds), ce pourquoi il n'est considéré viable que dans des environnements très particuliers (réseaux relativement statiques et de petite taille) (Perkins & Bhagwat 1994).

2.2.3.9.2 DSR (Johnson *et al.* 2001; Said *et al.* 2011) : Le protocole DSR (Routage à Source dynamique) est basé sur l'utilisation de la technique "routage source". Dans cette technique, la source des données détermine la séquence complète des nœuds à travers lesquels les paquets de données seront envoyés. Un nœud initiateur de l'opération de découverte de routes diffuse un paquet de requêtes de route dans l'ensemble du réseau. Si l'opération de découverte est réussie, l'initiateur reçoit un paquet réponse de route qui liste la séquence des nœuds à travers lesquels la destination peut être atteinte. Le paquet réponse de route contient donc un champ contenant la séquence des nœuds visités durant la propagation de la requête dans le réseau. Afin d'assurer la validité des chemins utilisés, le protocole DSR exécute une procédure de maintien de routes. : Quand un nœud détecte un problème dans la transmission (rupture de liens), un message d'erreur de route est envoyé à l'émetteur original du paquet. Ce message d'erreur contient l'adresse du nœud qui a détecté l'erreur et celle du nœud qui le suit dans le chemin. Lors de la réception du paquet erreur de route par le nœud source, le nœud concerné par l'erreur est supprimé du chemin sauvegardé, et tous les chemins qui contiennent ce nœud sont tronqués à ce niveau-là. Par la suite, une nouvelle opération de découverte de routes vers la destination est initiée par l'émetteur.

2.2.3.9.3 AODV : Le protocole AODV s'inspire des protocoles DSDV et DSR (Perkins & Royer 1999), il réduit le nombre de messages diffusés en créant les routes quand cela est nécessaire, contrairement au protocole DSDV qui maintient la totalité des routes. Ceci a pour effet de limiter la répercussion des modifications topologiques aux seules routes en cours d'utilisation. L'AODV utilise le principe des numéros de séquence afin de maintenir la cohérence des informations de routage et ainsi utiliser les routes les plus

récentes, car à cause de la mobilité des nœuds dans le réseau, les routes changent fréquemment, ce qui rend les routes maintenues par certains nœuds invalides. De la même manière que dans le DSR, l'AODV utilise une requête de demande de route dans le but de créer un chemin vers une destination donnée.

Cependant, l'AODV maintient les chemins d'une façon distribuée en gérant une table de routage au niveau de chaque nœud appartenant au chemin recherché. Un nœud diffuse une requête de route RREQ vers un nœud destination si la destination n'est pas connue au préalable, ou la durée de vie du chemin existant vers la destination a expiré, ou le chemin est devenu défaillant. Les nœuds qui reçoivent ces paquets les diffusent à leur tour jusqu'à atteindre la destination ou au moins un nœud qui possède une information de routage récente vers la destination recherchée. Les nœuds situés sur le parcours de la requête conservent, dans leur cache, l'adresse du nœud qui leur a relayé la requête. L'adresse de ce nœud fournit l'adresse du saut suivant vers le nœud source. Cette information est utilisée lors du retour de la réponse de demande de route RREP pour permettre d'aiguiller cette réponse jusqu'au nœud source. Le champ numéro de séquence destination du paquet RREQ contient la dernière valeur connue du numéro de séquence associée au nœud destination qui est copiée de la table de routage. Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient, quant à lui, la valeur du numéro de séquence du nœud source.

Afin de maintenir l'état correct des routes, une transmission périodique d'un message hello est effectuée. Si, par exemple, trois messages hello consécutifs ne sont pas reçus à partir d'un nœud voisin, le lien en question est considéré comme étant défaillant et un message d'erreur RERR est envoyé à chaque source concernée par ce lien afin de lui permettre de mettre à jour ses informations de routage en relançant de nouvelles procédures de recherche de routes.

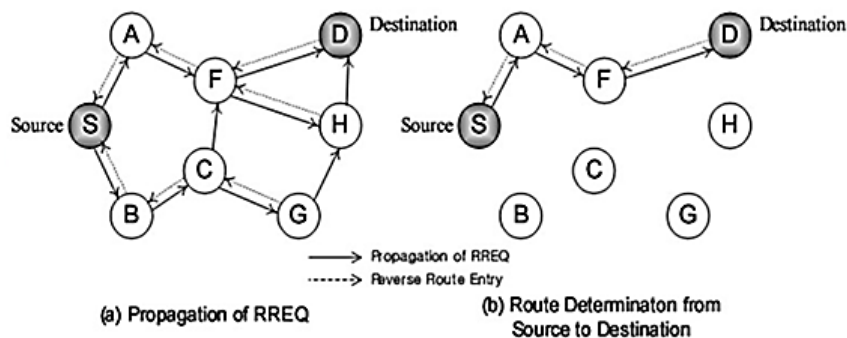


FIGURE 2.4 – Procédure de découverte de route du protocole AODV

2.2.3.9.4 ZRP (Zone Routing Protocol) : (Haas & Pearlman 2001) Le protocole ZRP a été introduit en 1997 par Haas et Pearlman, il définit pour chaque nœud une zone de routage (zone radius), qui inclut tous les nœuds dont la distance minimale (en nombre de sauts) à ce nœud est d. Les nœuds qui sont exactement à distance d sont appelés nœuds périphériques. Pour

trouver une route vers des nœuds situés à une distance supérieure à d , ZRP utilise un système réactif, qui envoie une requête à tous les nœuds périphériques. Pour cela, ZRP met en œuvre deux types de fonctionnements : IARP (IntraZone Routing Protocol) et IERP (InterZone Routing Protocol). Basé sur un protocole à vecteur de distance, l'IARP permet, en utilisant une technique proactive, de trouver toutes les routes jusqu'à une distance d . l'IERP quant à lui, permet d'établir les routes vers les nœuds à plus de d sauts d'une façon réactive.

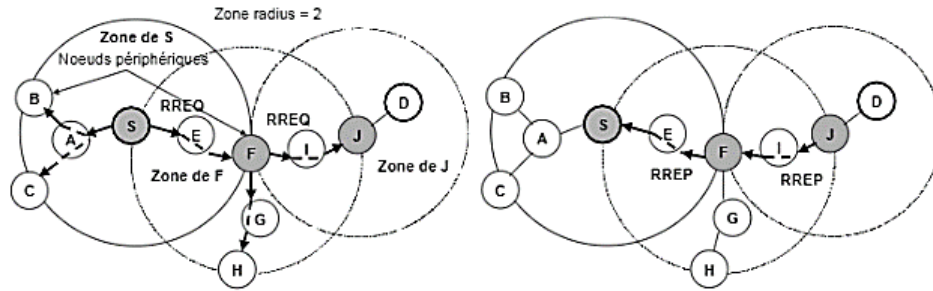


FIGURE 2.5 – Exemple de routage ZRP (Lohier et al. 2002)

CBRP (Cluster Based Routing Protocol) : CBRP est un protocole permettant une certaine réorganisation du réseau Ad hoc mobile en zones formant des clusters(Jiang et al. 1998). A travers des échanges des messages « Hello », les nœuds appartenant au même cluster choisiront un nœud passerelle qui s'appelle « cluster-head » ou « gateway » en se basant sur sa position dans le réseau et sa visibilité des autres nœuds. Les routes sont établies à la demande, comme pour un protocole réactif mais uniquement par les chefs de groupe : si un nœud veut envoyer un message, il demande à son responsable de groupe de lui déterminer la route à suivre. La route trouvée est agrégée au fur et à mesure du message de découverte et le nœud destinataire connaît ainsi le chemin de retour.

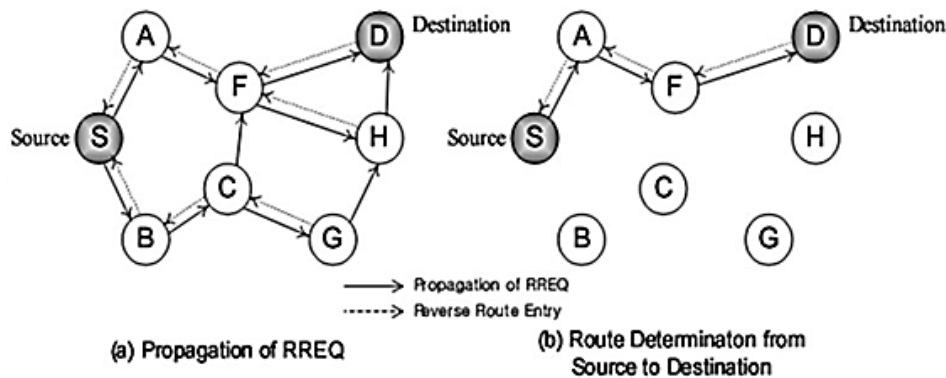


FIGURE 2.6 – Différents types de nœuds dans le protocole CBRP

Protocole de routage ZHLS :

Zone-Based Hierarchical Link State Routing , appelé aussi "Routage à État de Liens hiérarchique basé sur les Zones"(Joa-Ng & Lu 1999), ZHLS est basé sur la décomposition du réseau en un ensemble de zones. Contrairement à CBRP, dans ZHLS, les membres d'une zone n'élisent pas de re-

présentants. Avec cette décomposition, on a deux niveaux de topologies : le niveau nœud, et le niveau zone.

La topologie basée sur le premier niveau donne la façon dans laquelle les nœuds, d'une zone donnée, sont connectés physiquement. Un lien virtuel peut exister entre deux zones, s'il existe au moins un nœud de la première zone, qui soit physiquement connecté à un nœud de l'autre zone.

Protocole de routage LAR :

Location-Aided Routing (Ko & Vaidya 2000) Protocole appelé aussi "Routage aidé par la localisation", est un protocole de routage réactif basé sur l'utilisation des localisations. Ce protocole procède d'une manière très similaire au protocole DSR . La principale différence entre les deux protocoles réside dans le fait que le LAR utilise les informations de localisations, fournies par le système de positionnement global appelé GPS (Global Positioning System), dans le but de limiter l'inondation des paquets de requêtes de route. Afin d'assurer cela, deux approches ; LAR₁ et LAR₂ (Goyal *et al.* 2011) peuvent être utilisées. Dans la première approche, le nœud source définit une région circulaire dans laquelle la destination peut être localisée.

La position et la taille de la région, sont estimées en se basant sur :

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

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

Protocole de routage DREAM :

Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (Ko & Vaidya 2000) DREAM est conceptuellement proche des protocoles de routage proactifs. Chaque nœud du réseau dispose d'une table de positions qui peut être assimilée aux tables de routage des nœuds utilisées par un protocole proactif. Pour cela, chaque nœud envoie des informations relatives à sa localisation, à tous les nœuds du réseau. Plus précisément, partant du principe qu'un nœud perçoit moins la mobilité d'un autre nœud lorsque ce dernier est éloigné, et donc que l'impact de cette mobilité est moins important au niveau du routage, les notifications de changements de position sont moins souvent diffusées au nœud lointain qu'elles ne le sont aux nœuds proches. Par ailleurs, les nœuds caractérisés par une forte mobilité diffusent plus souvent leurs coordonnées géographiques que les autres.

Protocole de routage GPSR

Greedy Perimeter Stateless Routing (Karp & Kung 2000) GPSR est proche dans l'esprit de LAR₂ (Ko & Vaidya 2000) Ce protocole détermine la route à suivre en minimisant les distances entre les nœuds et la destination tout comme LAR₂ (c'est le mode "Greedy Packet Forwarding"), mais un second mécanisme est mis en œuvre en cas de blocage (c'est le mode "Perimeter"). Dans ce cas, le nœud n'ayant pas de voisin plus proche (en distance) que lui de la destination passe le relais à ses voisins qui eux peuvent en avoir un.

Dans ce qui précède, nous avons décrit le principe de fonctionnement des protocoles de routages usuels dans les MANET, tout en illustrant les

principales différences entre leurs mécanismes de fonctionnement selon la philosophie adaptée par chaque protocole. Dans ce qui suit, nous allons décrire en détail le fonctionnement du protocole OLSR, qui demeure l'objet de notre recherche.

Synthèse D'après les explications fournies dans le présent chapitre, nous pouvons distinguer quatre types de protocoles de routage : proactifs, réactifs, hybrides et géographiques (Usop *et al.* 2009; Clausen *et al.* 2003) La Figure 2.7 Récapitule les principaux protocoles connus dans le monde des réseaux adhoc

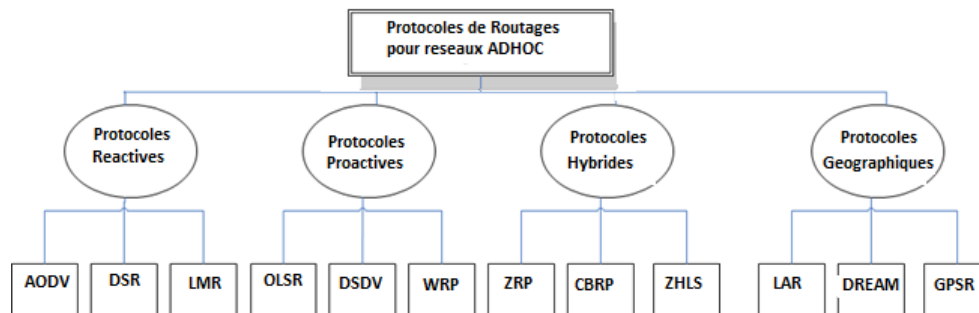


FIGURE 2.7 – Synthèse des Protocoles de routage Ad hoc

Les protocoles proactifs possèdent de bonnes aptitudes en termes de temps de réponse, car quand un nœud souhaite communiquer avec un autre nœud, il trouve immédiatement dans sa table de routage la route adéquate pour atteindre ce nœud.

Cependant, un surcoût significatif est engendré par les échanges périodiques de messages de contrôle.

Les protocoles réactifs résolvent plus ou moins le défaut des protocoles proactifs tout en augmentant le temps de réponse. Le surcoût engendré en utilisant l'approche réactive est moindre dans certaines configurations réseau. Néanmoins, il peut demeurer élevé dans d'autres. De manière générale, les protocoles réactifs et proactifs présentent des performances différentes selon les caractéristiques du réseau. Dans le cas d'un réseau dense par exemple et/ou lorsque l'échange des données est intense, le choix d'un protocole proactif s'avère plus judicieux, car un protocole réactif entraîne la diffusion excessive de messages de demande de routes qui risquent de saturer le réseau. En revanche, dans une configuration opposée, à savoir un réseau à densité faible et/ou à faible trafic, choisir un protocole réactif est plus intéressant, car il ne surchargera pas inutilement le réseau par des flux continuels d'informations de routage entre les nœuds. Afin de tirer profit des avantages des protocoles réactifs et proactifs, des protocoles qui mêlent généralement les deux modes (fonctionnant dans l'un ou dans l'autre mode suivant des conditions prédéfinies, ont été proposés. Dans ce type de protocoles, on utilise une reconnaissance locale de la topologie réseau jusqu'à un nombre relativement petit de sauts, par un échange périodique de trames de contrôle, autrement dit par une technique proactive. Les routes vers des nœuds plus lointains sont obtenues par un schéma réactif, c'est-à-dire par l'utilisation de paquets de demandes de routes qui sont dans la majorité des cas diffusés dans tout le réseau (Belkheir 2015).

Les protocoles géographiques optimisent le routage en introduisant la position du nœud et éventuellement sa vitesse. Ces nouvelles données sont très pertinentes pour optimiser la recherche d'un meilleur chemin entre la source et la destination, mais ne sont pas forcément adaptées à tous les types de réseaux. En effet, ces protocoles supposent que le nœud dispose d'un moyen de connaître sa position, tel qu'un GPS, ce qui n'est pas toujours possible. En revanche, dans le cas de réseau de véhicules, ce type de protocoles semble plutôt bien adapté. Chaque famille de protocoles de routage est plus ou moins adaptée à un type de réseau. Il convient donc de définir précisément les caractéristiques du réseau (taille, mobilité des nœuds, ressources des nœuds, volume d'information à échanger ...) afin de bien choisir un protocole de routage adapté (Gupta & Pradhan 2013).

2.2.4 Le protocole OLSR

(Optimized Link State Routing) L'OLSR est un protocole proactif qui a été normalisé par le groupe de travail MANET (Mobile Ad hoc Network) (Rhee *et al.* 2008) à l'IETF (Internet Engineering Task Force) dans le « RFC 3626 » (Clausen *et al.* 2003). Comme son nom l'indique, l'OLSR est un protocole à état de lien optimisé ; il obtient aussi des routes de plus court chemin. Alors que dans un protocole de routage classique à état de lien, chaque nœud déclare ses liens directs avec ses voisins à tout le réseau. Avec l'OLSR, les nœuds ne déclarent qu'une sous-partie de leur voisinage grâce à la technique des relais multipoints. En effet, ce protocole est classé parmi les protocoles proactifs, sa force se résume dans la mise à jour continue des tables de routage, permettant ainsi la vérification périodique des différentes routes, surtout où le réseau demeure fortement mobile et sa topologie est sujette à des variations continues dues aux déplacements des différents éléments le constituant. Pour se faire, ce protocole est basé sur la notion des relais multipoints (MPR), qui consistent essentiellement, pour un nœud donné, à ignorer un ensemble de liens et de voisins directs, qui sont redondants pour le calcul des routes de plus court chemin : plus précisément, dans l'ensemble des voisins d'un nœud, seul un sous-ensemble de ces voisins est considéré comme pertinent. Cette pertinence est choisie par des critères permettant d'atteindre tout le voisinage à deux sauts (tous les voisins des voisins). Le protocole OLSR a été mis en application dans de grands projets. La DARPA a choisi OLSR comme protocole de référence pour les réseaux tactiques. D'autres applications dans le domaine civil ont été réalisées. Avec ce grand développement d'OLSR, de nombreuses extensions de ce protocole ont été développées, on notera par exemple :

- QOLSR : OLSR avec qualité de service (QoS)
- OLSR v6 : OLSR avec autoconfiguration
- MOLSR : Multicast OLSR
- SOLSR : OLSR avec sécurité (Barki *et al.* 2020)

2.2.4.1 Notion de relais multipoints (MPRs)

Les MPRs visent à minimiser la surcharge due à l'inondation des messages de contrôle par la réduction des retransmissions redondantes dans la même région. Chaque nœud choisit un ensemble de nœuds parmi

ses voisins distants de 1 saut (1hop) pour transmettre ses messages. Cet ensemble est baptisé « MPR set ». Les voisins d'un nœud N qui ne sont pas dans l'ensemble du « MPR set », reçoivent et analysent les messages broadcast de ce nœud sans les retransmettre.

Chaque nœud dans l'ensemble du groupe de voisins à 2 sauts du nœud N (voisin du voisin mais pas le nœud N), doivent avoir un lien symétrique vers l'ensemble MPR(N).

Chaque nœud maintient l'information sur l'ensemble des voisins qui l'a sélectionné comme MPR. Ce groupe est appelé « MPR selector ». Cette information est obtenue par la diffusion des messages « HELLO ».

2.2.4.2 Fonctionnement d'OLSR

L'OLSR différencie entre deux groupes de fonctions :

- Fonctions principales (core), nécessaires pour le bon fonctionnement de l'OLSR dans un réseau Ad-hoc.
- Fonctions auxiliaires permettant l'interopérabilité de l'OLSR avec d'autres domaines de routage (non OLSR) ou la redondance de la topologie du réseau.

L'IANA a attribué le port 698, utilisant le protocole UDP pour le transfert des messages de contrôle. Les fonctions principales du protocole sont :

- Format du paquet
- écoute du lien (link sensing) – via des messages HELLO
- Détection du voisinage réseau – via des messages MID
- Sélection des nœuds MPR
- Diffusion des messages de contrôle de topologie – Messages TC
- Calcul des routes et construction de la table de routage

Les fonctions auxiliaires du protocole sont :

- Compatibilité avec les interfaces non OLSR
- Notification de la couche liaison (pour mettre à jour les liens physiques)
- Redondance de la topologie
- Redondance du groupe des MPRs

La diffusion d'un message, à tout le réseau, par répétition, peut se faire par l'inondation classique utilisant la règle « un nœud retransmet un message si et seulement si il ne l'a pas déjà reçu ». La diffusion par relais multipoints, diminue le nombre de retransmissions en utilisant la règle de suivante : « un nœud retransmet un message si et seulement si il ne l'avait pas déjà reçu, et il vient de le recevoir d'un nœud dont il est un relais multipoint ». La figure 2.8 illustre l'apport d'OLSR dans la réduction du nombre de retransmissions sur un graphe simple. Supposons qu'un nœud émette un message, et que pour diffuser cette information au réseau ses voisins répètent cette information. Dans l'image, à gauche, où tous les voisins d'un nœud retransmettent, six répétitions (les nœuds en noirs) sont nécessaires. Par contre, en utilisant la retransmission par les relais multipoints seuls (à droite), on économise deux retransmissions.

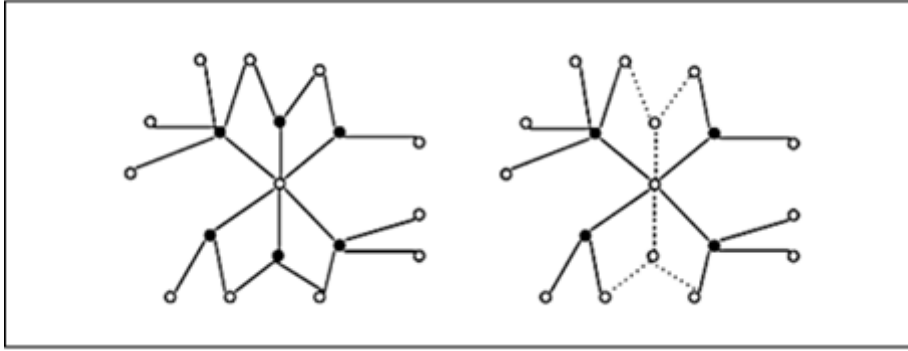


FIGURE 2.8 – Apport de l'implémentation des MPRs

2.2.4.3 Format du paquet OLSR

Pour la compatibilité du protocole OLSR avec UDP ainsi que l'IPv4 (V6), le format du paquet est uniforme. Le RFC 3626 définit un format général du paquet du protocole OLSR, illustré dans la figure. Ce format est unique pour tous les messages circulant sur le réseau. En plus des messages d'échange de trafic de contrôle HELLO et TC (Topologie Control), le protocole OLSR propose deux autres types différents de messages : MID (multiple Interface Declaration) et HNA (Host and Network Association). Chaque paquet peut contenir plusieurs messages identifiés par un type. Ceci permet d'envoyer plusieurs informations à un nœud en une seule transmission. Selon la taille de la MTU (Maximum Transfer unit), un nœud peut concaténer plusieurs types de messages et les transmettre ensemble. Par conséquent différents types de messages peuvent être émis ensemble mais traités et retransmis différemment dans chaque nœud. Quand ce dernier reçoit un paquet, il examine les entêtes des messages et en détermine le type selon la valeur du champ message type. Dans l'OLSR, un message de contrôle individuel est uniquement identifié par une adresse initiale (Originator address) et son numéro de séquence MSN (Message Sequence Number). Le champ Originator adresse indique la source d'un message, par contre le champ MSN permet d'éviter le traitement et relayage multiple de ce même message pour un nœud.

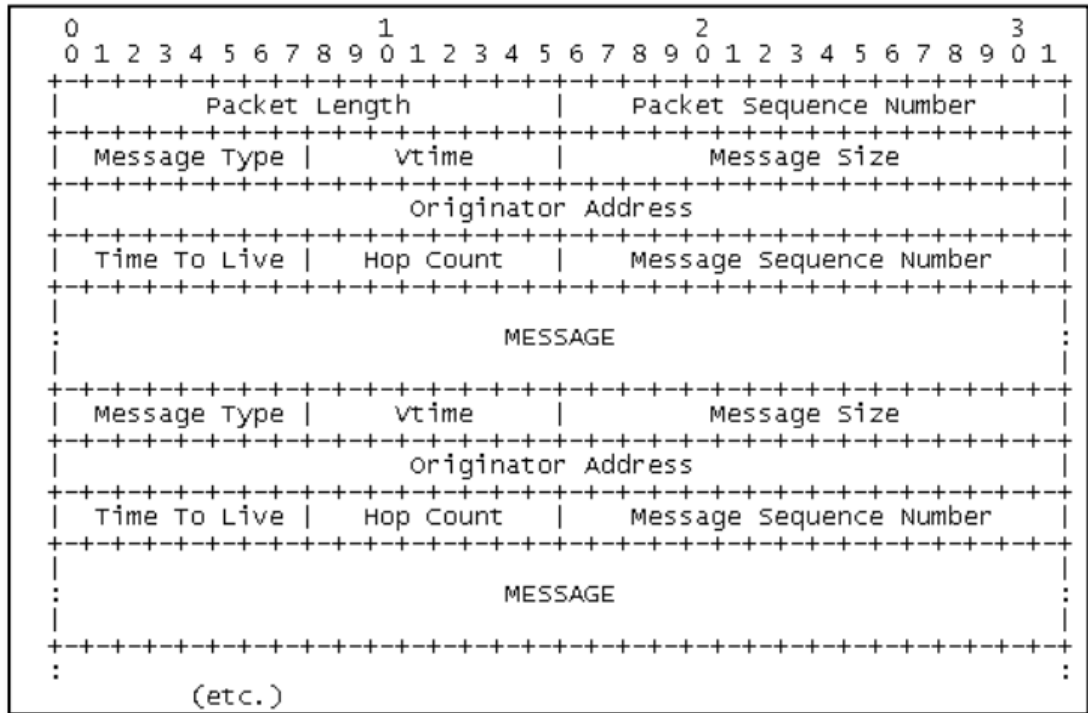


FIGURE 2.9 – Format du paquet OLSR

2.2.4.4 Messages HELLO

Dans l'OLSR, l'échange des informations relatives à l'état des liens entre les nœuds du réseau ainsi que la découverte du voisinage d'un nœud est possible par l'échange périodique des messages HELLO. Le format de ces derniers est comme suit :

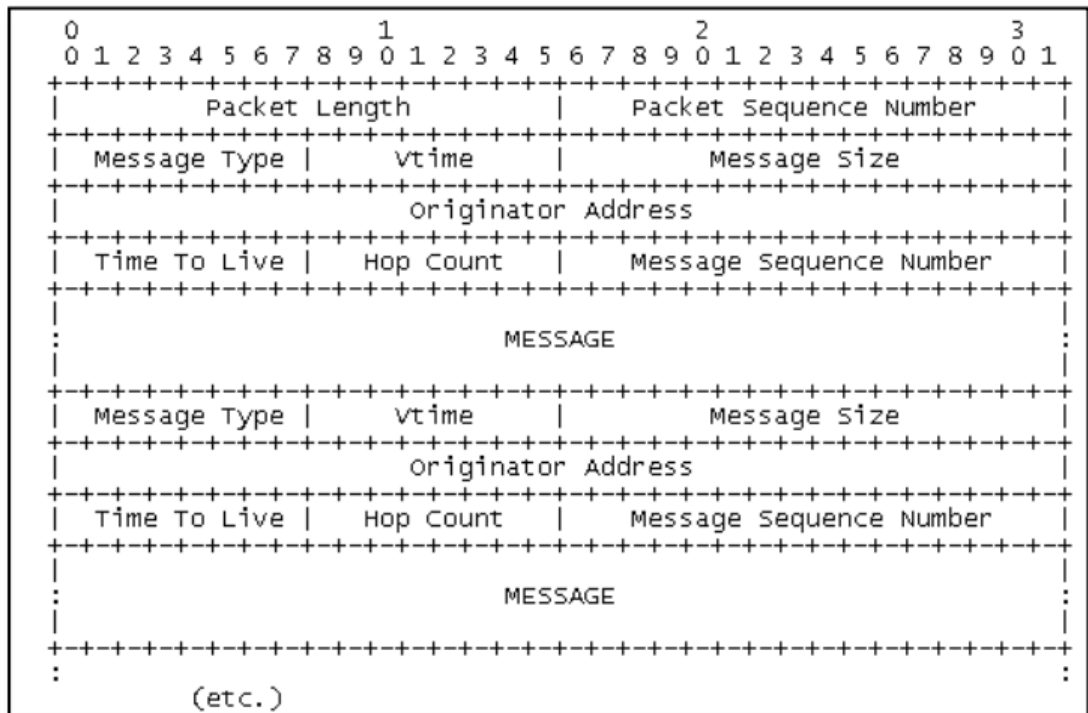


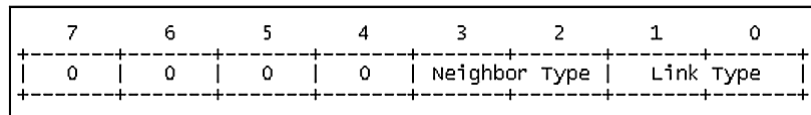
FIGURE 2.10 – Format du message « Hello »

- **Reserved** : Ce champ est laissé vide ou contient (0000000000000000) est réservé pour une utilisation ultérieure. En effet, ce champ sera employé dans le présent travail afin d'échanger les informations relatives à l'énergie résiduelle de chaque nœud.
- **H-Time** : Ce champ spécifie l'intervalle d'émission des messages HELLO, employé par le nœud sur chaque interface particulière, cet intervalle est représenté par ça mantisse (quatre bits les plus forts du champ H-Time et par son exposant (quatre bits les moins significatifs).
- **Willingness** : Ce champ spécifie l'aptitude du nœud à router les paquets vers les destinataires, il est configuré par la méthode suivante :
 - WILL_NEVER =0
 - WILL_LOW =1
 - WILL_DEFAULT =3
 - WILL_HIGH =6
 - WILL_ALWAYS =7

Le champ « Willingness » peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 7; WILL_NEVER signifie qu'il est impossible que le nœud soit sélectionné pour router les paquets vers les autres destinataires à cause de ses contraintes intrinsèques; tandis que WILL_ALWAYS veut dire que ce nœud doit toujours être sélectionné pour router les paquets vers les autres destinataires.

- LinkCode

Le champ Link code de taille 8 bits, contient à la fois les informations concernant les liens vers les nœuds voisins et le type de ces derniers.



A travers des valeurs fournies par le champ Link code, un lien peut être soit symétrique ou asymétrique ou perdu. Aussi, un voisin ayant au moins un lien symétrique avec le nœud concerné, peuvent être désignés dans le groupe des MPRs de ce nœud.

- Link Message Size : le champ spécifie la taille du message en octets, mesurés entre deux champs « link code » successifs.

La génération d'un message HELLO est basée sur les informations contenues dans la base d'information du lien local de chaque nœud. Pour chaque interface ce message contiendra une liste des liens sur cette interface ainsi qu'une liste de tout le voisinage associée à cette interface. La règle retenue afin de rafraichir ces informations est que chaque lien et chaque voisin doit être cité au moins une fois durant le laps de temps baptisé *REFRECH_INTERVAL*.

Afin de mettre à jour les changements rapides de la topologie du réseau, un message HELLO est émis au moins une fois durant un intervalle de temps baptisé *HELLO_INTERVAL* défini par le RFC 3626 par 02 secondes. Le message HELLO concerne l'information entre l'interface du nœud ainsi que celle du voisin. Donc, il ne doit jamais être transféré par le nœud voisin.

Des algorithmes sont proposés dans le RFC 3626 pour chaque scénario suivant :

- Écoute et détection de l'état du lien (link sensing)
- Détection du voisinage (neighboring detection)
- Détection des voisins distants de 02 sauts (02hop neighbors)

2.2.4.5 Messages TC

(*Topology Control*) Ces messages permettent de déclarer les sous-ensembles de voisinage qui constituent les relais multipoints. Ils sont diffusés par relais multipoints (MPRs). Ces messages permettent à chaque nœud de maintenir à jour sa table d'information sur la topologie et faciliter le calcul de sa table de routage. Le format d'un message TC est illustré par la figure 2.11 :

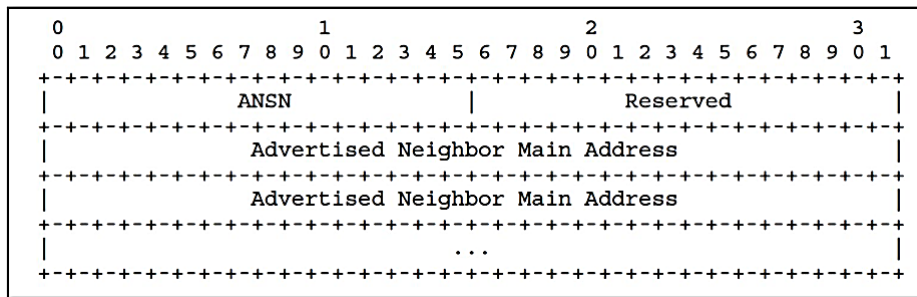


FIGURE 2.11 – Format du message « TC »

- ANSN (Advertised Neighbor Sequence Number) les numéros de séquence (Sequence Number), sont employés pour déclarer les routes les plus nouvelles ou autrement dit les plus fraîches (fresh routes). Lors d'un changement de voisinage, le nœud met à jour sa table de voisinage en incrémentant son propre numéro de séquence. Ce numéro est envoyé dans le champ (ANSN) du message TC. À la réception d'un message TC et en se basant sur le numéro de séquence, un nœud peut juger si les informations sont plus fraîches que celles existantes.
L'OLSR utilise les principes de numéro de séquence afin d'éviter le problème des boucles infinies et des transmissions inutiles des messages sur le réseau. Additivement, ceci permet une consistance des informations de routage afin d'éviter les routes invalides lors du changement de la topologie du réseau ad hoc, dû à la mobilité des nœuds.
- Reserved :comme dans le cas du message HELLO, ce champ doit être rempli par une suite de zéros, signifiant qu'il est réservé pour une utilisation future.
- Advertised Neighbor Main Address :Ce champ contient l'adresse principale du nœud

2.2.4.6 Détection du voisinage

Chaque nœud détecte toutes les interfaces de ses voisins ayant un lien direct et symétrique avec l'une de ses interfaces. En raison de l'incertitude

de la propagation radio, le lien entre deux nœuds voisins peut être unidirectionnel. Les liens doivent donc être vérifiés dans les deux sens avant de les considérer comme valides. Alors, chaque nœud doit diffuser périodiquement un message « HELLO » à son voisinage direct. Ce message contient les informations relatives aux interfaces entendues par ce nœud : la liste des adresses des interfaces des nœuds voisins avec leurs états de lien.

Un lien entre les interfaces d'un nœud et son voisin peut avoir l'un des trois états suivants : « Symétrique », « asymétrique », ou « perdu ».

- Symétrique : signifie que le lien est validé comme bidirectionnel est qu'il est possible de transmettre des données dans les deux sens.
- Asymétrique : signifie que le nœud entend l'interface du voisin mais le lien n'est pas encore validé dans l'autre sens.
- Perdu : Un lien est dit perdu si ce lien a été déclaré précédemment étant symétrique ou asymétrique mais à ce moment aucun message n'est reçu du nœud déclaré perdu.

Chaque nœud maintient une base d'informations de son voisinage, contenant la liste des voisins directs et leurs interfaces multiples, les voisins à deux sauts, les relais multipoints et les sélecteurs de relais multipoint. La figure 2.12 illustre un exemple de détection de voisinage. Dans cet exemple, chaque nœud possède une seule interface sans fil. Il est nécessaire qu'un nœud possédant plusieurs interfaces, choisisse l'adresse d'une de ses interfaces comme son adresse principale.

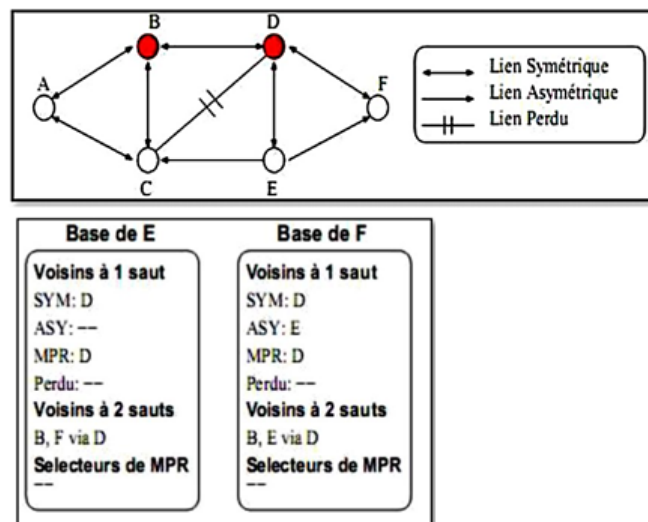


FIGURE 2.12 – Exemple d'informations de voisinage dans OLSR

La figure 2.12 décrit le processus de découverte des voisins entre deux nœuds A et B. En premier, le nœud A envoie à B un message HELLO qui ne contient aucune information. Une fois B reçoit ce message, il enregistre A comme voisin asymétrique car B ne trouve pas son adresse dans le message. Le nœud B envoie par la suite un message HELLO déclarant qu'il entend A. Ce dernier trouve son adresse dans le message et enregistre B comme voisin symétrique. À son tour, B trouve son adresse dans le message HELLO de A et déclare ce dernier comme voisin symétrique.

L'ensemble des voisins immédiats (ou à 1saut) d'un nœud « S », possédant un lien symétrique avec ce dernier est noté $N_1(s)$. Les voisins à 2sauts

d'un nœud s sont déterminés par la formule suivante :

$$N_2(x) = \{y/y \neq s \text{ and } (\exists x \in N_1(S)) \text{ and } (y \in N_1(x))\} \quad (2.1)$$

Les ensembles $N_1(s)$ et $N_2(s)$ de chaque nœud « s » sont formés grâce aux échanges périodiques des messages HELLO. Ceci permet à tous les nœuds d'avoir une vision à 1saut et à 2sauts de la topologie du réseau et avoir toutes les informations nécessaires pour construire les chemins vers leur destination, dans le périmètre à 1saut et à 2sauts. Les messages HELLO sont diffusés sur toutes les interfaces du nœud émetteur et ils sont reçus par tous les voisins qui se trouvent à un saut de ce nœud. Ces messages sont envoyés avec une fréquence déterminée par l'intervalle HELLO_INTERVAL (la valeur par défaut est de 2 secondes). Les voisins qui reçoivent ces messages, les traitent et ne les relaient pas. Les messages HELLO permettent également de découvrir les voisins à deux sauts (c'est-à-dire, les voisins des voisins). Les informations de voisinage fournies par ces messages sont valides pendant une durée de vie NEIGHBOR_HOLD_TIME qui est égale à $3 \times \text{HELLO_INTERVAL}$. Une approche simple permettant de détecter la non-validité d'un lien OLSR est la perte de 3 messages HELLO successifs, mais d'autres techniques peuvent être utilisées dans l'OLSR.

2.2.4.7 Sélection des Relais Multipoints

La technique d'inondation est utilisée dans plusieurs algorithmes de routage pour la diffusion des messages à tous les nœuds dans un réseau. Avec cette technique, chaque nœud renvoie une copie du message qu'il reçoit pour la première fois à tous ces voisins immédiats. Ce mécanisme a un impact sur les ressources du réseau en termes de bande passante et de consommation d'énergie. Or, les réseaux Ad hoc ont des ressources limitées et les enjeux de performance sont capitaux.

Dans ce contexte, le protocole OLSR utilise une technique appelée inondation par relais multipoint pour optimiser la diffusion à travers le réseau et ainsi réduire la charge du trafic. Ainsi, chaque nœud « s » sélectionne un sous ensemble de points appelés MPR (Multipoint Relay) parmi ses voisins de $N_1(s)$ et qui lui permettent d'être rejoint par tous les nœuds dans $N_2(s)$. Or, la connaissance de $N_1(s)$ et $N_2(s)$ de chaque nœud « s » permet la transmission des messages dans tout le réseau. L'échange périodique des messages HELLO permet à chaque nœud dans le réseau de mettre à jour ses ensembles $N_1(s)$ et $N_2(s)$. C'est ainsi que l'ensemble des relais multipoints est recalculé à chaque changement dans la topologie du réseau. L'ensemble MPR(s) des relais multipoints d'un nœud s forme un arbre recouvrant et il est défini de la manière suivante :

$$\text{MPR}(s) \subseteq N_1(s) / \{\forall y \in N_2(x) \exists x \in \text{MPR}(s) / y \in N_1(x)\} \quad (2.2)$$

La figure 2.13 illustre la différence entre l'inondation par relais multipoints et l'inondation classique et l'apport apporté par la technique des MPRs dans la réduction des messages de diffusion. On remarque que dans le cas classique, il faut 24 retransmissions pour atteindre les nœuds à 3-sauts du nœud s . Alors que dans le cas où on utilise les relais multipoints,

seulement 11 retransmissions sont nécessaires pour avoir les mêmes résultats.

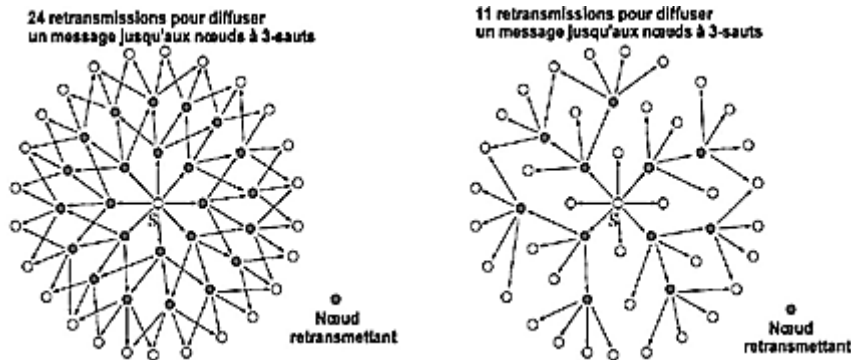


FIGURE 2.13 – Diffusion par inondation classique Vs inondation par relais multipoints

Dans un cas général, pour atteindre le voisinage $N_2(s)$ d'un nœud (s) , il faut $MPR(s)+1$ émission. Donc pour minimiser le nombre d'émissions possibles dans le réseau et par la suite augmenter les performances, il faut trouver un nombre minimal de relais multipoints pour chaque nœud (c.-à-d., minimum de $MPR(s)$). Or la sélection des MPR est un problème NP-complet car ceci est équivalent à calculer un sous ensemble dominant dans un graphe. Plusieurs heuristiques ont été proposées à cet effet dans plusieurs articles. L'algorithme 1 est celui adopté dans le RFC 3626.

Algorithme 1 : Sélection des MPR par OLSR (RFC3626)

Entrées : $N^1(i), N^2(i)$

Début

$MPR_i = \emptyset$

Etape 1 : $N^2(i) = N^2(i)$

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : W(j) = 7\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$

Etape 2 :

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^2(i) \setminus MPR_i : \exists k \in N^2(i), (j,k) \in E \text{ ET } |\{(q,k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\}| = 1\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$

Etape 3 : TANT QUE $N^2(i) \neq \emptyset$ FAIRE

$A = \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : W(j) = \text{MAX}\{W(x), x \in N^1(i) \setminus MPR_i\}\}$

SI $|A| > 1$ ALORS

$B = \{j \in A : |\{(j,k) \in E : k \in N^2(i)\}| = \text{MAX}\{|\{(o,p) \in E : p \in N^2(i)\}|, \forall o \in A\}\}$

FIN SI

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in B : d^*(j) = \text{MAX}\{d^*(x), x \in B\}\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^2(j)$

FIN TANT QUE

Cet algorithme se base essentiellement sur le degré de couverture et la position du nœud dans le réseau (le nombre des voisins couverts par le nœud). Or sélectionner en permanence le même nœud comme MPR réduira rapidement son énergie et pourra influencer sur l'efficacité du réseau. Dans la suite de ce travail, seul l'algorithme présenté dans le

RFC3626 sera considéré. La figure 2.14 présente un exemple d'application de l'algorithme décrit précédemment pour la sélection de l'ensemble des relais multipoints MPR(s) d'un nœud.

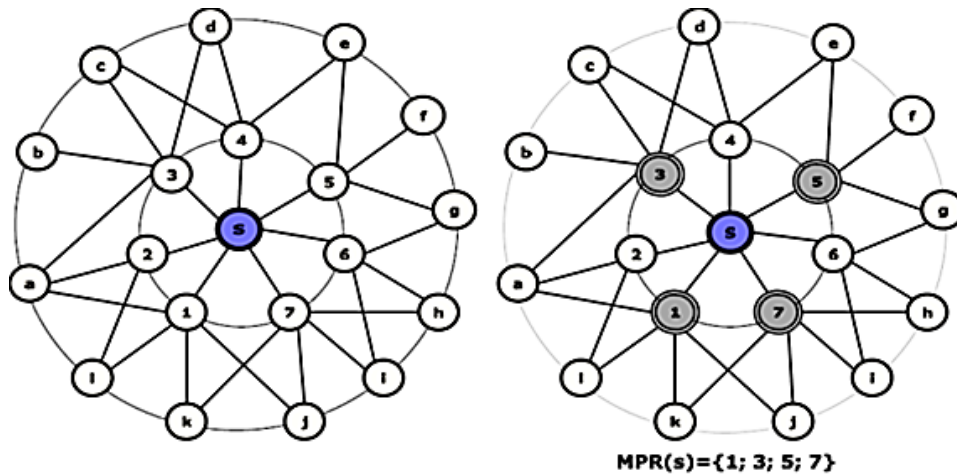


FIGURE 2.14 – Diffusion par inondation classique Vs inondation par relais multipoints

2.2.4.8 Gestion de la topologie

L'Algorithme 3.1 est utilisé par chaque nœud dans le réseau pour construire l'ensemble des relais multipoints ou MPRS. Ces derniers sont responsables de diffuser des messages appelés Topology Control (TC) à une fréquence de répétition fixée par le paramètre TC_INTERVAL. Les messages TC échangent les informations nécessaires sur la topologie du réseau afin de permettre à tous les nœuds de construire leurs tables de routage. Un message TC contient les nœuds ayant sélectionné le nœud (s) origine du TC comme relais multipoint et un numéro de séquence associé à l'ensemble des sélecteurs de relais multipoint qui sera incrémenté à chaque changement de cet ensemble.

Uniquement les nœuds MPRs ont le droit de rediffuser les TCs. La réception de ces messages TCs, permet à chaque nœud dans le réseau de maintenir une base contenant les informations topologiques du réseau qui donne une vision globale (mais non pas entière) de la topologie du réseau. Cette base est constituée d'un ensemble de tuples [T_dest, T_last, T_seq, T_time]. T_dest est l'adresse principale de la destination, qui est accessible en un saut à partir du nœud avec l'adresse principale T_last. En d'autres termes, T_last est un relais multipoint de T_dest. T_seq est un numéro de séquence et T_time spécifie le temps au bout duquel le tuple est expiré. La figure 2.15 montre la base topologique de l'ensemble des nœuds du réseau ad-hoc de la figure 2.12.

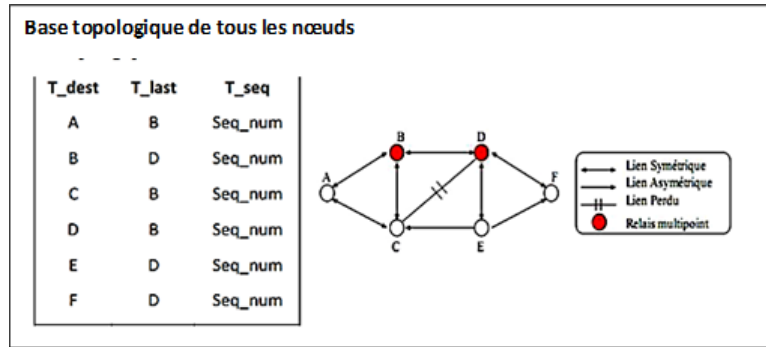


FIGURE 2.15 – Optimisation de l’inondation par des relais multipoint

Le protocole OLSR propose deux autres types différents de messages : MID (multiple Interface Declaration) et HNA (Host and Network Association) pour assurer les fonctions secondaires décrites précédemment.

2.2.4.9 Messages MID (multiple Interface Declaration)

Les messages MID sont émis par les nœuds ayant des interfaces OLSR multiples, afin d’annoncer des informations sur la configuration de ses interfaces au réseau. Un message MID contient une liste d’adresses où l’adresse « I_if_addr » correspond à une interface, tandis que « I_main_addr » est l’adresse principale du nœud émetteur. La diffusion de ces messages se fait par les relais multipoints afin de minimiser le nombre de messages circulants sur le réseau. Le format des messages MID est comme le suivant :

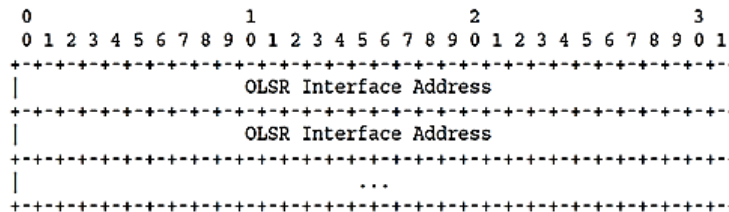


FIGURE 2.16 – Format des messages MID

2.2.4.10 Messages HNA (Host and network Association)

Les messages HNA sont émis que par un nœud qui a des interfaces multiples dont celles sont non-MANET, dont le but est de fournir la connectivité d’un réseau OLSR à un réseau non OLSR. Le nœud passerelle émet des messages HNA contenant une liste d’adresses des réseaux associés et de leurs masques réseau (netmasks). Les nœuds se trouvant dans les réseaux MANET vont construire des tuples pour tous les nœuds passerelles où chaque tuple contient .

- A_geteway_addr : adresse principale du nœud passerelle.
- A_network_addr : adresse de sous réseau.
- A_netmask : adresse de masque réseau.
- A_time : la durée de tuple.

Le format des messages HNA est illustré dans la figure 2.17

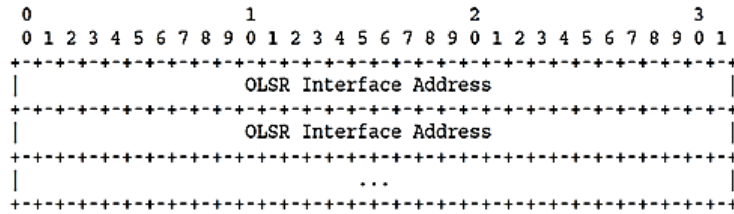


FIGURE 2.17 – Format des messages HNA

Lors du calcul de la table de routage, chaque nœud maintient une table de routage qui lui permet d’acheminer les paquets vers un destinataire. Ces tables de routage sont calculées grâce à l’algorithme du plus court chemin de Dijkstra en se basant sur les informations sur les états des liens stockés par les nœuds, ainsi que celles échangées par les messages de contrôle TC. Ces tables de routage sont recalculées à chaque changement survenu dans la topologie afin de permettre de mettre à jour les routes vers toutes les destinations dans le réseau. La figure 2.12, schématise un réseau mobile Ad hoc et le tableau 2.1 récapitule la table de routage calculée par le nœud A, en se basant sur les informations échangées par les messages HELLO et TC. Le tableau 2.1 illustre la table de routage associée au nœud A de l’exemple de la Figure 2.15 :

TABLE 2.1 – Table de routage calculée par le nœud A

Nœuds destinataires	Nœud du dernier saut	Numéro séquence	Durée de vie
B	Direct	1	IF A
C	Direct	1	IF A
D	C	2	IF A
E	Direct	1	IF A
F	Direct	1	IF A
G	B	2	IF A
G	F	2	IF A
H	F	2	IF A
I	C	4	IF A
J	C	3	IF A

2.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, plusieurs protocoles de routage (classification et fonctionnement) cités dans la littérature et employés dans les réseaux Ad hoc mobiles et les réseaux de capteurs mobiles ont été présentés et expliqués.

Un protocole de routage destiné pour les réseaux Ad hoc mobiles doit prendre en compte, certaines spécificités de ces derniers, à savoir ; la mobilité et la densité des nœuds, les caractéristiques liées à la nature des nœuds mobiles (capacité limitée en traitement, stockage et énergie) ainsi que l'optimisation de la bande passante limitée dû à l'utilisation des technologies sans fil.

Le protocole OLSR qui a été détaillé dans ce chapitre, fait l'objet d'une proposition d'une nouvelle version dans la présente étude. Afin de mieux comprendre son fonctionnement, quelques avantages ont été présentés à savoir l'utilisation des relais multipoints et son apport à l'optimisation du processus d'inondation. Le choix des nœuds MPR est effectué par un algorithme décrit par la RFC 3626 est basé essentiellement sur la position d'un nœud dans le réseau. Cette dernière représente une limitation de ce protocole puisque cet algorithme ne prend pas en compte l'équilibrage de charge lors de l'attribution de cette tâche, la chose qui conduit à l'épuisement des énergies des nœuds bien placés qui seront toujours sollicités. Par conséquent, engendre la création des trous et affecte, d'une manière importante, la stabilité et l'efficacité du réseau. Cette limitation ainsi que les conséquences, à un effet négatif, sur la métrique essentielle dans les réseaux de données, baptisée (qualité de service) ou QoS.

LA QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

3

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	46
3.2	DÉFINITION DE LA QUALITÉ DE SERVICE	46
3.3	MÉTRIQUES DE LA QUALITÉ DE SERVICE	47
3.3.1	Bande passante	47
3.3.2	Délai de bout en bout	47
3.3.3	Gigue (variation du délai)	48
3.3.4	La perte des paquets	48
3.3.5	Approches IntServ/RSVP et Diffserv dans les réseaux fi- liaires	48
3.4	QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC	50
3.5	APPROCHES DE QUALITÉS DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	52
3.5.1	Approche FQMM (Flexible QoS Model for MANETs)	52
3.5.2	Approche SWAN (Service Differentiation in Wireless Ad Hoc Networks)	53
3.5.3	iMAQ (Integrated Mobile Ad hoc Qos framework)	54
3.6	QUALITÉ DE SERVICE (QOS) DANS LA COUCHE MAC (MEDIUM ACCESS CONTROL)	54
3.6.1	Norme IEE 802.11 de différenciation de services et ses ex- tensions	55
3.6.2	MACA/PR (Multiple Access Collision Avoidance with Piggyback Reservation)	55
3.7	ROUTAGE AVEC QOS DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES	56
3.7.1	Défis des protocoles de routage avec QoS dans les réseaux ad hoc mobiles	56
3.7.2	Quelques approches de routage dans les réseaux ad hoc mobiles	57
3.8	PROTOCOLES DE SIGNALISATION	58
3.8.1	INSIGNIA	59
3.8.2	Dynamic QoS / dRSVP	60
3.9	CONSERVATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILE	60
3.9.1	Formes de dissipation d'énergie dans un nœud capteur	61
3.9.2	Surconsommation d'énergie	62

3.10	CONSERVATION D'ÉNERGIE ET QoS	63
3.10.1	Techniques du Duty-cycling	63
3.10.2	Protocoles Sleep/Wakeup	63
3.11	CONSERVATION D'ÉNERGIE AU NIVEAU MAC	64
3.11.1	Les protocoles fondées sur les techniques TDMA (Time Division Multiple Access)	64
3.11.2	Protocoles MAC avec contention	65
3.11.3	Protocoles MAC hybrides	66
3.12	ROUTAGE ET CONSERVATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AHWSN	66
3.12.1	EARLEAHSN (Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks)	67
3.12.2	EARCBSN (Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sen- sor Networks)	67
3.12.3	GBR (Gradient-Based Routing)	67
3.12.4	Conservation d'énergie au niveau transport	68
	CONCLUSION	69

3.1 INTRODUCTION

L'objectif de la QoS dans les réseaux est d'atteindre un comportement optimale de la communication, garantir une meilleure transmission des données et une utilisation optimale des ressources du réseau. La qualité de service QoS (Quality of Service) est le degré de satisfaction d'un utilisateur des services fournis par un système de communication. La QoS est définie comme la capacité d'un élément du réseau (routeur, nœud , application) de garantir un niveau de satisfaction pour l'acheminement des données. La RFC 2386 caractérise la QoS comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic de bout en bout.

3.2 DÉFINITION DE LA QUALITÉ DE SERVICE

La qualité est une notion subjective et évolutive. Ainsi, la qualité a été définie par Deming comme étant la satisfaction des besoins des consommateurs ou utilisateurs (Nguyen & Minet 2007). Les standards ISO (international organisation of standardization), dans sa nouvelle et dernière version ISO 9000 : 2015 définit la qualité comme l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet à satisfaire des exigences (Hamze 2015). En l'occurrence, la qualité dans les réseaux informatiques connue sous le terme qualité de service (QoS) a été définie par la RFC 2386 comme un ensemble des garanties à assurer, par le réseau, pour le transport d'un trafic d'une source vers une destination. L'ensemble des garanties sont assurées, lors du transport des données, par l'implémentation de différents mécanismes au sein du réseau afin de partager équitablement, dans la mesure du possible, les différentes ressources pour satisfaire les besoins (exigences) des utilisateurs réels ou virtuels (applications, services, etc.), tels que; le débit minimal, la fiabilité et la sécurité. De son côté, l'utilisateur perçoit cette qualité, selon l'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications), comme l'effet général de la performance d'un service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur du service. D'un autre côté purement technique, cette qualité est la capacité d'assurer la fluidité du trafic et/ou service demandée pour une application, un hôte ou un routeur. Afin de montrer la subjectivité, à titre d'exemple; dans le cas d'une application de visioconférence, la qualité ciblée serait le délai de transfert, afin de garantir une fluidité de la communication; alors que dans le cas d'un service de transfert de fichiers la qualité ciblée serait principalement le débit. La majorité des applications exigent une fiabilité de transfert des données qui sera garantie par le facteur de nombre de paquets transmis avec succès. En parlant des réseaux filaires, les mécanismes introduits pour garantir cette QoS (MPLS : Multi-Protocol Label Switching, IntServ : Integrated Services, DiffServ : Differentiated Services), se basent, essentiellement, sur la connaissance parfaite de l'état du réseau notamment; la bande passante, la fiabilité des liens et les délais de transmission (Faucheur *et al.* 2002). Ce qui n'est pas toujours le cas dans les réseaux adhoc mobiles, où la connaissance de l'état du réseau n'est pas toujours disponible en temps réel. Ceci, à cause de la nature dynamique des réseaux adhoc mobiles et suite aux contraintes imposées par l'utilisation de la technologie sans fil (atténuation et interférences du signal). Par

conséquence les mécanismes classiques conçus initialement pour les réseaux filaires et statiques, demeurent inutilisables pour les réseaux sans fil et dynamiques, ce qui nécessite le développement de nouvelles solutions adaptées et à plusieurs couches du réseau, à l'instar ; de la couche 2 (accès au canal radio avec QoS), de la couche 3 (routage avec QoS), et les couches supérieures (sécurité de l'application...), par la proposition de nouveaux modèles de QoS ([Ouididi 2010](#)).

3.3 MÉTRIQUES DE LA QUALITÉ DE SERVICE

Afin de quantifier cette notion de QoS et d'avoir une mesure de cette dernière, un certain nombre de métriques de différentes natures, mais convergeant au même but est celui de garantir la QoS et répondre au besoin implicite et explicite des utilisateurs ont été définies ([Espès 2008](#)). Les métriques de la qualité de service peuvent être de nature ;

- Additives comme le délai de transmission de bout en bout qui est défini par la somme des délais de transmissions écoulés par le nombre de sauts afin d'atteindre la destination
 - Concave comme le cas de la bande passante qui est égale à la bande passante minimale offerte par les différents liens de transmission
 - multiplicatives comme le cas de la probabilité de perte des paquets qui égale au produit des probabilités de perte des paquets de tous les liens tout le long du chemin de transmission ([Espès 2008](#)) La RFC 2386 caractérise la QoS comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination ([Crawley et al. 1998](#)). Ces besoins peuvent être traduits en un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables en terme de :
- Délai de bout en bout
 - Durée de vie du réseau
 - Bande passante
 - Nombre de paquets perdus
 - Sécurité de la donnée transmise

Dans ce qui suit, nous présenterons brièvement quelques métriques de QoS.

3.3.1 Bande passante

La bande passante représente la largeur de bande en fréquence allouée par le réseau pour un service donnée. Dans le cas des réseaux informatiques, la bande passante définit la capacité du réseau à transmettre des données de bout en bout. La gestion de la bande passante est un élément important pour la garantie de la qualité de service ([Chaudet 2001a](#)).

3.3.2 Délai de bout en bout

Le délai de bout en bout caractérise le temps effectué pour l'envoi d'un paquet par un émetteur jusqu'à son arrivée à destination ([Beaubrun & Molo 2008](#)). Ce délai implique :

- Délai de propagation typiquement lié à la topologie du réseau. La densité et l'étendue du réseau affectent ce délai. Aussi, la distance entre l'émetteur et le récepteur affecte ce délai.
- Délai de traitement des paquets lors de leur passage par les nœuds du réseau. Il est caractérisé par la capacité intrinsèque des routeurs en termes de files d'attente ainsi que les politiques de priorité implémentées afin de fluidifier le trafic.
- Délai de transmission dépendant essentiellement du volume de l'information transmise. Ce paramètre étroitement lié à la charge du réseau et le partage de la bande passante.([Boukhalfa 2006](#))

A cet effet, garantir ce critère de délai signifie proposer des mécanismes assurant l'efficacité du traitement de la donnée et de sa transmission de bout en bout, en incluant les trois critères précités.

3.3.3 Gigue (variation du délai)

La gigue est exclusivement liée à la variation du délai de transmission de bout en bout au. Cette dernière est principalement due à la différence existante entre la performance des équipements du réseau dans le traitement des paquets. Ce paramètre nuit automatiquement à la qualité de service requise, et nécessite à implémenter des mécanismes d'ordonnement des paquets à la réception([Beaubrun & Molo 2008](#))

3.3.4 La perte des paquets

Cette métrique permet de mesurer le taux de pertes des paquets des paquets dans le réseau, interprété par la non délivrance d'un paquet de données. Ceci se produit lorsqu'il y a des erreurs d'intégrité sur les données, la plupart du temps due à un encombrement du réseau ([Theoleyre 2006](#)).

3.3.5 Approches IntServ/RSVP et Diffserv dans les réseaux filaires

Le groupe Intserv de l'IETF (Internet Engineering Task Force), on développés des modèles de QoS pour le réseau Internet. L'architecture est dite à intégration de services et s'articule sur un ensemble de mécanismes ajoutés à l'architecture Internet dite de best effort, à savoir :

- La réservation des ressources pour des flux de haute priorité
- Le contrôle d'admission dans le réseau

Il s'agit globalement d'implémenter un mécanisme afin de signaler aux éléments du réseau (nœuds, routeurs et sous réseaux) des contraintes de QoS exigées par les flux traversant le réseau. En fonction de cette exigence, les éléments du réseau affecte un des services Intserv selon les ressources disponibles. Additivement, IETF a défini un protocole baptisé RSVP (Resources Reservation Setup Protocol) ([Sondi Obwang 2010a](#); [Le Grand 2001](#))

permettant de réserver dynamiquement des ressources au sein d'une architecture Intserv, comme est illustré par les figures 3.1 et 3.2. Une fois la réservation des ressources est effectuée, ces dernières seront affectées à un flux donné.

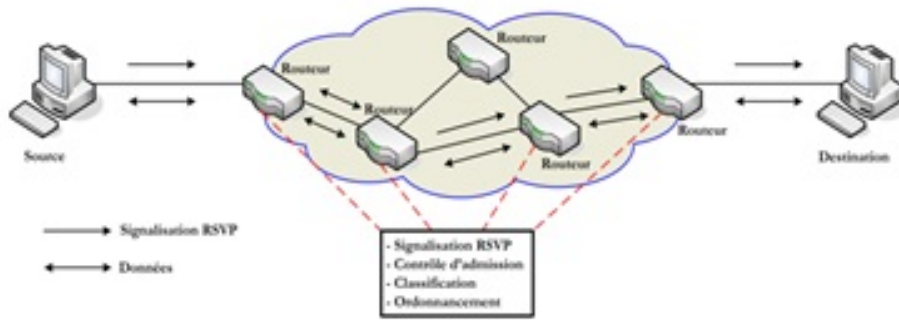


FIGURE 3.1 – Le mode Intserv /RSVP

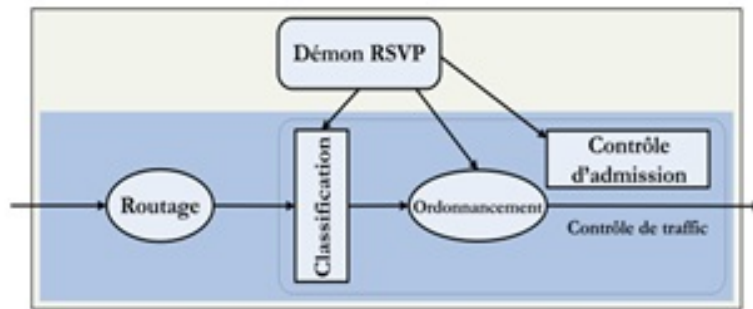


FIGURE 3.2 – Routeur à intégration de services

Toutefois, l'inconvénient majeur de l'approche Intserv/RSVP demeure celui de la charge de traitement du flux qui devient plus complexe en fonction de la complexité du flux traversant le réseau. Afin de pallier à ce problème, IETF a développé une autre approche baptisée DiffServ (Géron 2006) (illustré par la figure 3.3). Ce dernier et en cas de congestion, permet de prioriser certains classes de trafic et vise leur protection. Le traitement des flux avec QoS dans Diffserv, est assuré plutôt par les nœuds d'extrémité que par le cœur du réseau qui demeure très simple.

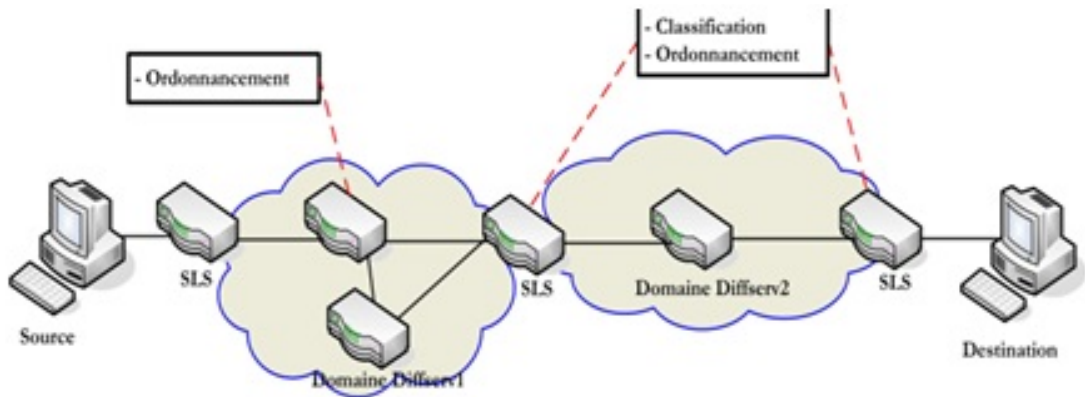


FIGURE 3.3 – Le modèle DiffServ

Ce protocole ajoute une information au champ DS (Differentiated Ser-

vices) à l'entête IP du paquet afin d'appliquer le mécanisme de différenciation des services et lui associe le comportement PHB (Per-Hop behavior). Ainsi, deux type de nœuds sont définis :

- Les " Cores nodes ", responsables du transit des paquets dans le réseau et constituent le cœur du réseau.
- - Les " edges nodes ", responsables de la classification des paquets selon le classe de service requise

Ainsi, les données utilisateurs sont traitées par classes, où chaque définit un ensemble de flux d'un utilisateur. Par ailleurs, Diffserv offre de la valeur ajouté à celle du best effort des réseaux sans QoS, mais il souffre d'un problème de flexibilité et de garantie comparé à Intserv. Aussi, ce protocole n'implémente pas un mécanisme de QoS pour le trafic multi-cast.

3.4 QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC

Comme a été déjà expliqué, la mobilité des utilisateurs ne cesse de s'accroître et le besoin en connectivité mobile est d'autant plus exigeant. Les utilisateurs exigent d'avoir les mêmes services offerts par les réseaux filaires que par les réseaux mobiles ad hoc. Ces exigences doivent être transparentes pour les utilisateurs, ce qui implique la nécessité de développer de nouveaux mécanismes et approches afin de satisfaire ce besoin. Afin de garantir un certain niveau de QoS dans les réseaux mobiles ad hoc mobiles, comparable à celui des réseaux filaires, il faut aller au-delà des protocoles de routage " best-effort ", initialement proposés dans les réseaux MANETs. L'implémentation de nouveaux mécanismes de QoS doit tenir en compte les contraintes imposées par les applications offertes, en termes de délai, bande passante, durée de vie... etc. Dans (Lakrami *et al.* 2015), une revue générale sur les différentes solutions de QoS proposées pour les réseaux MANETs. Ces solutions ont été réparties sur quatre (04) catégories :

- Modèles de QoS implémentant des vues globales dans lesquelles des garanties sont assurée.
- Les protocoles d'accès au médium implémentant des mécanismes assurant une certaine QoS, notamment dans les couches basses du modèle OSI.
- Les protocoles de routage avec qualité de service imposant des critères de QoS sur les routes sélectionnées pour transmettre les données.
- Les protocoles de signalisation offrant des mécanismes de réservation de ressources selon la nature et la criticité des données, indépendamment au protocole de routage implémenté.

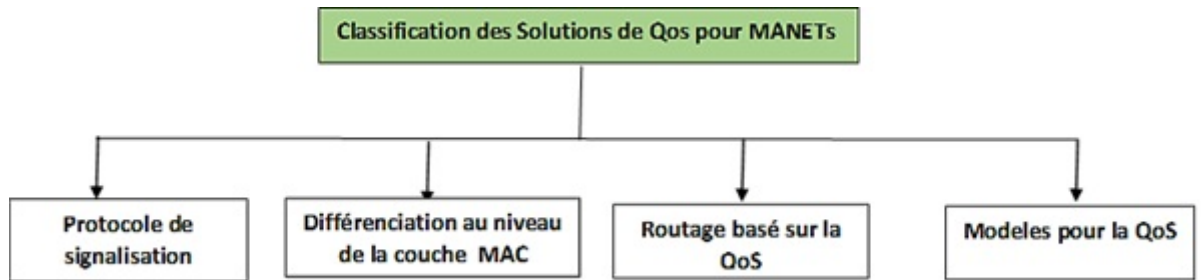


FIGURE 3.4 – Solutions de QoS pour les réseaux ad hoc.

Cette répartition illustrée par la figure 3.4, identifie les différentes solutions imbriquées et décrites à plusieurs échelles afin de garantir la QoS dans un réseau ad hoc mobile. Une deuxième classification a été proposée dans (Jaddi 2006) à savoir, la distinction entre les approches statistiques et les approches quantitatives. Les approches statistiques permettent d’offrir suffisamment de ressources aux trafics prioritaires comparés aux trafics moins prioritaires. La norme IEEE 802.11e implémente cette approche. La nature d’un réseau ad hoc mobile rend l’ordre des priorités difficile à respecter de bout en bout, à part d’appliquer une stratégie de voisin en voisin. De notre point de vue, l’implémentation des stratégies quantitatives semble le plus approprié pour des applications strictes telles que la vidéo et l’audio. Dans (Ali & Sai Kumar 2008), les garanties quantitatives ont été divisées en deux parties à savoir : à priori et à postériori. Les mécanismes développés à postériori se soucient d’adapter l’environnement du réseau conformément aux exigences des applications, peu importe le protocole de routage implémenté. Cependant, les approches à priori quant à elles, visent la notion de la QoS. Le routage avec QoS implique la sélection des routes implémentant un ensemble de métriques, comme le délai, la bande passante, la gigue ou la perte des paquets. Une multitude de protocoles de routage avec QoS ont été proposés dans la littérature, additionnée à ceux du jargon classique (réactifs et proactifs). Ces protocoles doivent satisfaire un contrôle d’admission afin d’estimer l’aptitude du réseau à transmettre des flux ayant des contraintes de QoS. Pour se faire, deux critères doivent être vérifiés :

- Le nombre des ressources exigées par une application : Les divers services proposés doivent définir leur besoin en ressources du réseau, telles que la bande passante requise ou la capacité de transmission exigée. Ceci-dit, les protocoles de routage avec QoS doivent être en mesure de quantifier la qualité de la route choisie pour transmettre le flux de l’application en question et non pas par destination. Cette technique de routage par flux assure un contrôle raffiné des ressources du réseau. Le flux envisagé pourra être divisés en plusieurs flux prenant chacun diverses routes.
- Une estimation préalable des ressources intrinsèques du réseau et disponibles le long des routes avant de transmettre les flux avec QoS. Cette approche à priori, demeure critique, sachant qu’un grande partie des protocoles de routage se basent sur la fonction routage que la fonction estimation des ressources. Cette dernière s’avère complexe dans les cas des réseaux ad hoc mobiles compa-

rés aux réseaux filaires à cause de la nature du réseau caractérisé par une forte mobilité et une topologie en constante variation, ce qui nuit à la pérennité des liens établis entre les nœuds.

Enfin, le routage avec QoS demeure un mécanisme d'élaboration et de maintenance des liens ayant implémentant certaines métriques de la QoS afin de fiabiliser le transfert des données entre les nœuds du réseau et de maintenir sa stabilité. Le contrôle d'admission demeure un point critique qui doit être pris en considération par ces nouvelles approches de routage. Un exemple dans (Clausen *et al.* 2003), qui propose un protocole baptisé CEDAR. Cependant, d'autres propositions étalent leurs propres méthodes d'estimation des ressources disponibles (Van Den Bossche 2007).

3.5 APPROCHES DE QUALITÉS DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

Comme il a été déjà expliqué, et à l'instar des réseaux filaires existants, la QoS dans les réseaux ad hoc mobiles a été implémentée dans les différentes couches du modèle OSI. Diverses méthodes ont été implémentées dans la couche physique, telles que :

- L'adaptation de la puissance d'émission en maximisant cette puissance pour les trafics prioritaires ;
- Maximiser la puissance d'émission pour les flux de données prioritaires
- Partage de charge entre les nœuds du réseau
- Instaurer des mécanismes de conservation d'énergie en vue de maximiser la durée de vie des nœuds fonctionnant sur batterie.

3.5.1 Approche FQMM (Flexible QoS Model for MANETs)

Comme a été illustré dans le paragraphe précédent, les deux approches Intserv et Diffserv sont plutôt adaptées aux réseaux filaires que pour les réseaux mobiles ad hoc. Le volume de traitement et la lourde signalisation engendrée par ces deux approches demeurent trop gourmands en bande passante, ce qui ne coïncide pas avec celle limitée et offerte par les réseaux ad hoc mobiles. De plus, le comportement statique de ces deux approches ne leur permet pas d'être de bons acteurs dans le cas des MANETs, qui sont caractérisés par une topologie dynamique en constante évolution. A cet effet, une approche dite FQMM pour (Flexible QoS Model for MANETs) (Nguyen & Minet 2006) a été développée pour des réseaux de petite ou de moyenne taille et qui repose sur une architecture plate (non hiérarchique) combinant les propriétés des modèles IntServ et DiffServ.

FQMM est une approche hybride, permettant le traitement par flux pour les données prioritaires et par classes pour les autres données. Comme est illustré par la figure 3.5, FQMM divise la couche réseau d'un nœud en deux parties à savoir : la partie basse baptisée " plan de relayage des données " et la partie haute dite " plan de contrôle et de gestion ". Le protocole de routage associé à ce modèle doit être en mesure d'implémenter des métriques de QoS. Toutefois, plusieurs inconvénients peuvent être énumérés, à savoir :

- La granularité par flux contraint la limitation de cette approche à cause de la taille du champ DS du paquet IP (1 octet).
- Il est difficile d'envisager un profil dynamique pour la négociation du trafic écoulé.
- Les contraintes dues au fonctionnement ad hoc du réseau telles que : la signalisation, la bande passante et la conservation d'énergie doivent être prise en charge par le protocole de routage associé à ce modèle (Xiao *et al.* 2000)

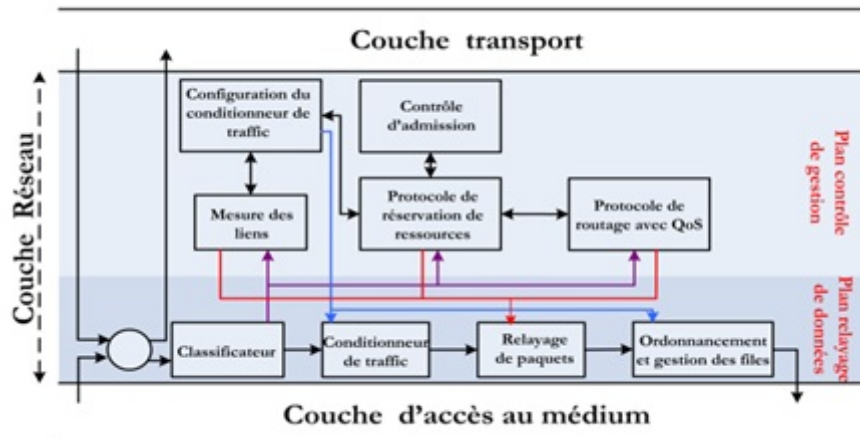


FIGURE 3.5 – Le modèle FQMM

3.5.2 Approche SWAN (Service Differentiation in Wireless Ad Hoc Networks)

Comme son nom l'indique, SWAN (Ahn *et al.* 2002) est une approche de différenciation de service proposée pour les réseaux ad hoc mobiles. SWAN implémente un certain nombre d'algorithmes de contrôle distribué pour assurer la différenciation de service d'une manière simple et efficace. Au niveau paquet, la priorité est laissée au trafic temps-réel, tout en assurant le trafic best effort admis par un nœud mobile dans le réseau. Avant toute décision d'acceptation d'un trafic temps-réel, le contrôle d'admission mesure la bande passante disponible sur le chemin emprunté par ce trafic. Cette mesure est effectuée par un protocole de routage. Il est important de noter que cette approche permet la régulation du trafic best effort par mesurer les délais écoulés au niveau MAC. Ce paramètre permet d'associer un certain degré de QoS pour les trafics acceptés. Aussi, le bit " ECN " (Explicit Congestion Notification) de l'entête du paquet IP notifiera la source d'une éventuelle congestion afin de réinitialiser le contrôle d'admission.

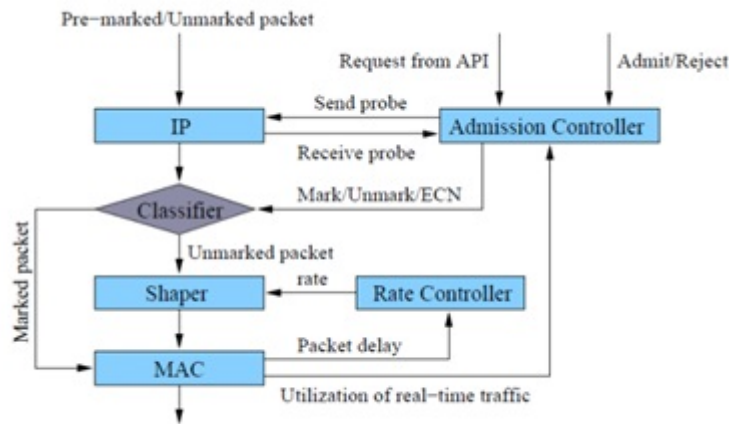


FIGURE 3.6 – Le modèle SWAN

3.5.3 iMAQ (Integrated Mobile Ad hoc Qos framework)

iMAQ (Ahn *et al.* 2003) supporte les transmissions multimédias dans un réseau ad hoc mobiles. Cette approche implémente une couche réseau permettant le routage ad hoc, ainsi qu’une couche logicielle (middleware), entre la couche réseau et la couche application. Le partage des informations entre chaque couche d’un nœud assure des satisfactions en terme de QoS pour les trafics gourmands comme les applications multimédias. L’idée demeure de prédire la location des nœuds par les informations échangées entre eux via la couche réseau. La couche logicielle quant à elle, permet de partitionner le réseau selon les ressources disponibles figure 3.7)

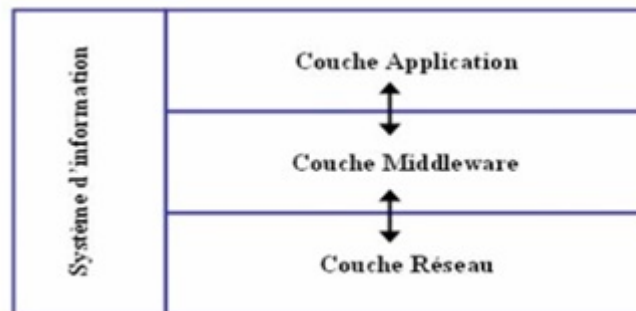


FIGURE 3.7 – Le modèle iMAQ

3.6 QUALITÉ DE SERVICE (QoS) DANS LA COUCHE MAC (MEDIUM ACCESS CONTROL)

Cette couche assure l’accès au medium radio dans le cas des réseaux MANETs. L’accès efficace et le partage des ressources radios demeurent primordial pour assurer une QoS de bas niveau. Aussi, le partage de bande entre les différents utilisateurs du réseau relève plusieurs défis afin de pallier aux problèmes de collisions et de disponibilité du réseau. A cet effet,

les approches de QoS dans la couche liaison doivent prendre en considération toutes ces considérations, en proposant des mécanismes adaptés aux réseaux MANETs. A l'instar des réseaux filaires, plusieurs propositions de schémas et d'outils de différenciation de service ont été déployés. Dans ce qui suit, nous énumérerons les plus prépondérants (Sra & Chand 2019).

3.6.1 Norme IEE 802.11 de différenciation de services et ses extensions

IEEE 802.11 est la norme célèbre dans le cadre des réseaux en général, elle demeure l'équivalent d'Ethernet en utilisant un médium sans fil. Agissant au niveau trames de données, les recherches sont axées à implémenter des outils de différenciation de services selon les priorités des données transmises. Dans (Aad & Castelluccia 2001), une proposition a été étudiée afin d'adapter dynamiquement certains critères à la DCF (Distributed Coordination Fonction), à savoir :

- L'implémentation des délais aléatoires avec priorisation des trames de données importantes, dans le mécanisme de détection de collision.
- Idem dans le cas de l'attribution des délais de silence dans le mécanisme (DIFS).
- La négociation de la MTU (Maximum Transmission Unit), il est envisageable de négocier différentes MTU selon la nature du trafic échangé.

Plusieurs tests ont été effectués afin de choisir le meilleur mécanisme dans le cas des réseaux ad hoc mobiles et la deuxième semble la plus conviviale. Dans nos jours, avec l'évolution de cette norme IEE 802.11, plusieurs variantes ont été développés concernant les réseaux mobiles (IEEE 802.11 b,g,n, ac, ad...), permettant d'apporter de nouveaux mécanismes de QoS au niveau MAC pour les différentes applications. D'autres normes IEEE peuvent être envisagés dans le cas des WPANs (Wireless Personal Area Network), selon la nature des interfaces physiques des nœuds du réseau et le débit utilisé, à savoir les normes IEEE 802.15.x (x : variante de la norme).

3.6.2 MACA/PR (Multiple Access Collision Avoidance with Piggyback Reservation)

Dans MACA/PR (Yang *et al.* 2011), la stratégie de l'accès au médium est effectuée par différenciation des priorités selon les flux échangés. Les flux standards traversent le réseau sans différenciation. Les flux avec contraintes de temps-réel, passent par une demande de transmission-réception (RTS-CTS). Ensuite, toutes les trames du flux temps-réel sont transmises avec acquittement du récepteur. La demande de transmission doit être renouvelée une fois qu'une trame n'est pas acquittée. Le mécanisme de réservation de la bande passante peut être effectué via des informations d'ordonnancement incluses dans les trames, informant les nœuds adjacents du nœud récepteur sur le temps d'arrivée de la prochaine trame. Une fois cette information reçue, ces derniers peuvent délayer leurs transmissions.

3.7 ROUTAGE AVEC QoS DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILES

Le routage de meure une fonctionnalité très importante dans le cas des tous les réseaux filaires et sans fil. Cette opération implémentée dans la couche réseau, permet d'élire des chemins généralement les plus-courts entre l'émetteur et le récepteur (best effort). Toutefois, le routage avec QoS doit implémenter des contraintes associées à celle du plus court chemin, incluant des métriques de la QoS telles que la bande passante, le délai, la gigue, la sécurité. . . etc. Contrairement aux réseaux filaires dont l'architecture est généralement stable et déterministe, le routage dans les réseaux ad hoc mobiles doit relever les défis de l'évolution de la topologie et la mobilité des nœuds (Sra & Chand 2019). Cela signifie que les schémas de routage implémentés dans les réseaux filaires ne sont plus adaptés aux réseaux MANETs. Un autre critère très important qui sera discuté plus tard dans ce chapitre, et la consommation en énergie des nœuds pendant la transmission des données. Cette métrique qui représente la base de notre chercher durant notre thèse, doit être prise en considération, notamment dans le cas des réseaux ad hoc mobiles incluant des nœuds fonctionnant sur batteries. Tout critère de QoS doit être cumulatif et doit assurer un certain niveau de performance, sans pour autant la dégradation d'un autre critère.

3.7.1 Défis des protocoles de routage avec QoS dans les réseaux ad hoc mobiles

De par les contraintes de la topologie et de la mobilité des nœuds dans les réseaux ad hoc mobiles, les protocoles de routages avec QoS doivent être en mesure de relever plusieurs défis, à savoir :

- Découverte dynamiques des routes entre les nœuds : la topologie en constante évolution contraint les protocoles de routage d'implémenter des mécanismes dynamiques afin de sélectionner des chemins optimaux implémentant des contraintes de QoS entre les différents nœuds du réseau.
- - Optimisation des ressources du réseau : Ceci est un critère très important afin de prolonger la durée de vie du réseau. En effet, la perte d'un nœud central dans le réseau à cause de l'épuisement de ses capacités intrinsèque nuit énormément à la stabilité du réseau et engendre une dégradation de ses performances.

Ceci-dit, les différentes spécificités du réseau ad hoc mobiles, à savoir les liens radios fragilisant la transmission de l'information, l'architecture plate et la topologie sans administration centralisée, rendent le développement des protocoles de routage avec QoS très compliqués à mettre en œuvre (Lohier *et al.* 2002). Le plus court-chemin n'est plus d'actualité et doit être remplacé par le chemin optimal. La topologie aléatoire du réseau ad hoc mobile exige une constante mise à jour dans les tables de routage, ce qui implique une consommation énorme de la bande passante et augmenta davantage la puissance de calcul des nœuds mobiles (Nguyen & Minet 2006).

3.7.2 Quelques approches de routage dans les réseaux ad hoc mobiles

Dans la littérature, une multitude d'approches de routage ont été élaborées dans le cadre des MANET, tenant compte des défis précités. Ces approches se basent généralement sur les protocoles de routages de best effort préalablement développés et traitent chacune, des aspects relatifs à la densité ou la mobilité du réseau. Dans ce qui suit, nous étalons à titre indicatif, une vue générale sur les différentes solutions proposées (Gangwar *et al.* 2012).

3.7.2.1 QOLSR (QoS Optimized Link State Routing)

Comme son nom l'indique QOLSR (Badis & Al Agha 2005) est une extension du protocole proactif OLSR. Il permet d'ajouter des extensions aux paquets de contrôle basiques d'OLSR (Hello et TC) pendant le processus de découverte du voisinage et de la sélection des MPRs. Cela signifie que les messages de contrôle échangés entre les nœuds transmettent davantage d'information sur d'autres métriques du réseaux telles que : la bande passante, le délai..etc. Ajouté à l'algorithme de Dijkstra permettant de choisir les routes du plus court délai, nous pouvons sélectionner des routes incluant d'autres paramètres selon la nature du trafic écoulé. Des flux gourmand en bande passante, doivent suivre des chemins offrant la bande passante requise pour assurer l'échange de trafic. D'autres mécanismes ont été proposés comme extensions au protocole OLSR qui demeure l'axe de notre recherche, seront détaillés dans le chapitre suivant.

3.7.2.2 DSDV+ (Destination Sequenced Distance-Vector+)

DSDV+ est une extension de DSDV pour implémenter de la QoS. DSDV+, estime la bande passante disponible dans une route par la mesure des time-slots disponibles sur un lien TDMA (Time division Multiple Access). Le mécanisme d'établissement de route en indiquant les time-slot qui doivent être utilisés entre la source et la destination. La réservation de ressources s'effectue en parallèle à ce mécanisme. DSDV+, définit une autre route secondaire de secours, garantissant un transfert non optimal dans le cas d'un échec de la route principale sélectionnée (Jun 2011). Ce protocole une meilleure estimation de la bande passante mais ne traite pas le souci des interférences causées par des unités sous-jacentes se rapprochant à l'émetteur.

3.7.2.3 TBR (Ticket-Based QoS Routing)

TBR (Xiao *et al.* 2002), a été développé dans le cadre des réseaux ad hoc faiblement mobiles. Son objectif principal est la réduction des messages de contrôle échangés dans l'établissement et la maintenance des routes. La découverte des routes s'effectue via des tickets logiques limitant le processus d'inondation. Cela signifie que chaque paquet de contrôle pour la découverte d'une route doit porter un ensemble de tickets. Arrivé à un nœud, il sera divisé en plusieurs messages d'observation transmis aux prochains sauts. Ces messages sont appelés des messages " fils " et

contiennent un sous-ensemble de tickets du message " père ". A destination, la route composée d'une multitude de sauts sera labellisée et les métriques de réservation de ressources en termes de QoS seront appliquées. Via ce mécanisme, les nœuds du réseau ont une parfaite connaissance des liens avec leurs voisins à 1 saut et pourra leur transmettre des demandes de routes. Le nombre de tickets échangés sera proportionnel à la qualité de service QoS requise par l'application échangée.

3.7.2.4 CEDAR (Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing Algorithm)

CEDAR (Sivakumar *et al.* 1999) est un protocole réactif proposés pour des MANETs de petites tailles et s'articule essentiellement sur la stabilité du cœur du réseau. Les informations relatives à la QoS sont sous les responsabilités des nœuds stables composant le cœur du réseau. CEDAT inclut trois caractéristiques principales :

- Sélection d'un cœur du réseau fiable : les nœuds formant le cœur du réseau doivent être performants et suffisamment dimensionnés pour l'établissement et le maintien des routes entre les autres nœuds d'extrémités.
- Diffusion des états des liens disponibles : ceci est une responsabilité exclusive du cœur du réseau, dont les nœuds le composant propagent les différents états des liens disponibles, incluant des métriques de QoS.
- Calculs des routes : En se basant sur le plus court chemin et la bande passante requise. Les routes sont divisées en deux : routes principales répondant aux exigences performantes de QoS et des routes secondaires de QoS moindre, empruntées lors de la perte des routes principales.

L'objectif principal étant de garantir des routes avec suffisamment de bande passante entre les nœuds du réseau.

3.7.2.5 BRuiT (Bandwidth Reservation under InTerferences influence)

BRuit est plutôt un mécanisme de réservation de la bande passante, implémenté par un protocole de routage réactif. Son objectif est de limiter les interférence entre les nœuds du réseau. Pour se faire, il implémente deux phases :

- Découverte du voisinage : permettant aux nœuds de disposer des informations relatives à la charge radio du réseau.
- Réservation des ressources : ceci est effectué par la sélection des routes répondant aux exigences des contraintes du flus échangé. Le contrôle d'admission se fera par chaque nœud selon la bande passante et la charge radio du médium (Chaudet 2001b).

3.8 PROTOCOLES DE SIGNALISATION

La signalisation est une notion qui a été héritée des réseaux à commutation de circuits. Son but est de permettre de réserver des ressources pour une application. Cette notion, a été aussi implémentée dans les réseaux informatiques pour la gestion du trafic dans le réseau. Deux approches de

signalisation peuvent être envisagées, à savoir : la signalisation à l'intérieur des paquets de données (In band) ou carrément par l'implémentation de paquets de signalisation (Out band) (Aït-Salem 2011a). Une stratégie de signalisation devra définir les outils implémentés pour le contrôle de flux ou la transmission des flux prioritaires (Pei *et al.* 2000). Les paquets de contrôle échangés entre les nœuds font partie de la signalisation, en échangeant des contraintes relatives à la disponible du réseau, aux exigences des flux échangés et les ressources disponibles afin de transmettre des flux prioritaires. Plusieurs mécanismes de signalisation ont été développés dans le cadre des réseaux ad hoc mobiles. Il seront discutés dans ce qui suit.

3.8.1 INSIGNIA

INSIGNIA (Lee *et al.* 2000), est une approche développée dans le cadre des réseaux ad hoc. La figure 3.8, illustre son fonctionnement. En effet, il implémente une signalisation in-band, encapsulant les informations de signalisation dans les paquets data IP. Cela évite la surcharge du réseau par les paquets de contrôle. INSGNIA permet de supporter deux types d'applications " best effort " et " temps réel ". Ainsi, il implémente des mécanismes d'adaptation rapide à toute évolution de la topologie du réseau affectant les liens radios. La QoS de service dans INSIGNIA est divisée en deux parties, à savoir celle de best effort offrant un niveau optimal en cas de disponibilité des ressources et l'autre pour le trafic temps réel assurant une bande passante dans le cas d'une éventuelle dégradation des performances du réseau. L'échange des données de signalisation permet au destinataire d'informer la source par toutes les informations de QoS relatives à la route le liant à l'émetteur. Ces informations sont dites " Qos reporting ", contenant des mesures sur la bande passante, délai, . . . etc. A noter que ces échanges permettent d'augmenter la puissance de calcul des nœuds. Pour des réseaux de haute densité et forte mobilité, ces messages de signalisation deviennent très importants et nuisent énormément à leur capacité de traitement. Dans (Lee *et al.* 2000), et afin de pallier à ce problème de surcharge, les auteurs ont proposé d'implémenter un mécanisme de contrôle de flux (flow management model), permettant d'associer à chaque session d'un utilisateur un service disponible, sans pour autant échanger de la signalisation entre la source et la destination (Espès 2008). Le modèle INSIGNIA demeure une approche de signalisation indépendante du protocole de routage implémentée . Ce modèle répond aux éventuels changements de la topologie du réseau. Il permet d'offrir des niveaux de QoS pour les flux temps réel, selon la disponibilité du réseau. Les informations de signalisation contenues dans les paquets data IP informent la nature du paquet IP et son degré d'importance dans les flux échangés. Si le paquet demeure important, un niveau de QoS adapté à ce paquet sera appliqué, selon la disponibilité des ressources du réseau.

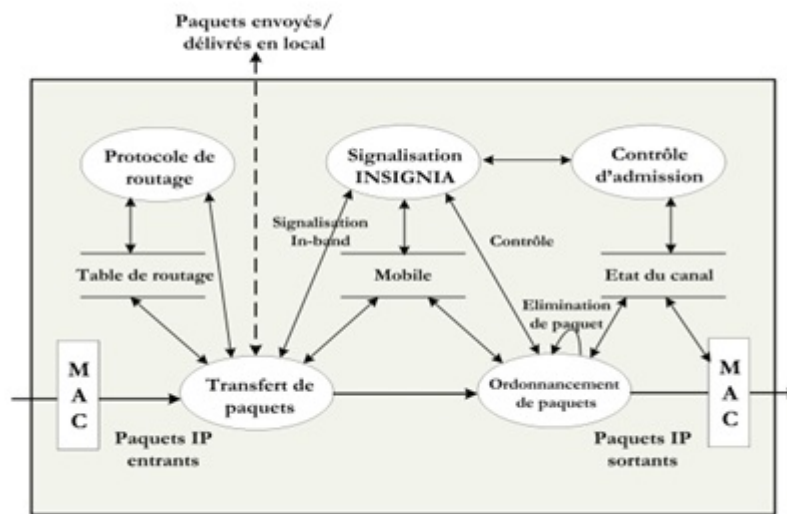


FIGURE 3.8 – L'architecture du protocole INSIGNIA

3.8.2 Dynamic QoS / dRSVP

Dynamic QoS ([Mirhakkak et al. 2000](#)) est une approche de QoS, permettant de réserver statiquement des ressources satisfaisant un niveau de service statique, tout au long de la durée de transmission. Les flux adaptatifs ne requièrent le même niveau de service, mais plutôt des seuils différents. A cet effet, cette approche permet de définir un intervalle de niveau de service, définissant ainsi une borne inférieure du débit requis pour le fonctionnement optimal de l'application et une borne supérieure, permettant de définir le débit maximal atteint. Une fois la réservation des ressources effectuée, l'émetteur est informé par le réseau quant à la quantité de la bande qui lui est fournie. Avec l'implémentation de l'approche Dynamic QoS, cette quantité de bande passante pourra changer lors de la transmission, dans le cas d'une congestion et d'indisponibilité de ressources, où par l'émetteur lui-même afin de libérer des ressources dont il n'a plus besoin. Cette approche demeure très efficace afin de réduire les rejets de réservation des ressources, mais nécessite des accords entre les émetteurs, dans le cas de l'absence d'une administration centralisée. Elle est plus adaptée pour des infrastructures avec point d'accès.

3.9 CONSERVATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AD HOC MOBILE

Dans les réseaux ad hoc mobiles et les réseaux de capteurs, les nœuds sont supposés fonctionner sur batterie sans alimentation fixe. La mise en réseau de ces unités mobiles ainsi que les échanges des données entre elles affectent la consommation de leurs batteries. Aussi, dans le cas des réseaux ad hoc mobiles, avec infrastructure plate, les nœuds mobiles peuvent éventuellement transmettre leurs données, ainsi relayer les données de leurs voisins. A cet effet, et toujours dans le contexte de la qualité de service

d'un réseau ad hoc mobile, l'énergie résiduelle d'un nœud est considérée comme une métrique importante qu'on doit tenir en considération, notamment dans la sélection des chemins optimaux entre la source et la destination. La perte d'un nœud mobile jouant un rôle important dans le réseau nuit drastiquement à la stabilité de ce dernier et engendre la création des trous, menant à des déconnexions entre les nœuds. Le partage de charge dans un réseau ad hoc mobile et la conservation d'énergie des nœuds augmentent et améliorent davantage la durée de vie du réseau et affectent directement ses performances en termes de QoS. La conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc mobile est un aspect qui a suscité beaucoup d'intérêt des chercheurs afin de proposer des mécanismes de QoS, implémentant des mécanismes permettant de prolonger la durée de vie du réseau.

3.9.1 Formes de dissipation d'énergie dans un nœud capteur

Les nœuds capteurs sont principalement alimentés par piles et sont amenés à avoir une autonomie de plusieurs mois, voire plusieurs années. Surtout dans des zones hasardeuses où les nœuds capteurs demeurent inaccessibles et dont le remplacement de leurs batteries n'est pas évident. A cet effet, l'analyse de la consommation des nœuds mobiles est impérative afin de proposer des solutions de conservation d'énergie efficaces et optimales. La dissipation d'énergie d'un nœud capteur se fait de manière générale en fonction des modules le constituant, à savoir :

- Microprocesseur/ Microcontrôleur : Généralement les MCUs possèdent divers modes de fonctionnement : " actif ", " idle " et " sommeil ", pour optimiser la consommation de leur énergie. Chaque mode est quantifié par une consommation d'énergie différente. Par exemple, le MSP4303 consomme 3 mW en mode actif, 98 μ W dans le mode " idle " et seulement 15 μ W dans le mode sommeil. Cependant, le passage d'un mode à un autre engendre une surconsommation de l'énergie. Ceci-dit, le temps écoulé dans un mode et la transition entre les modes affectent directement la consommation totale en énergie d'un nœud capteur.
- La radio : Idem que pour le MCU, la radio quant à elle, opère dans quatre modes de fonctionnement : émission, réception, " idle ", et sommeil. Dans (Xu *et al.* 2001), il s'avère que le mode " idle " implique une consommation égale à celle du mode " réception ". Cela signifie que l'extinction complète de la radio demeure plutôt judicieux que de la laisser en mode " idle ", dans le cas où aucune émission ou réception n'est effectuée. De même que pour les MCUs, le passage de la radio d'un mode à un autre engendre une surconsommation de l'énergie. En effet, le passage du mode sommeil en émission pour l'envoi d'un paquet, provoque une consommation d'énergie à cause de la mise en service de l'émetteur (circuits électroniques) .

Il est à noter que les datasheets des constructeurs sous-estiment généralement les sources de consommations selon les expérimentations faites dans (Hurni & Braun 2009), notamment dans le mode idle du nœud-capteur. Par ailleurs, d'autres sources de consommations peuvent être

envisagées, comme le traitement des données, la conversion analogique-numérique, le stockage de l'information s'il y a lieu, le conditionnement des signaux nécessitant des amplificateurs consommant de la puissance, lecture et écriture mémoire... etc. La grande variété des capteurs dans le monde industriel implique que la consommation varie d'un capteur à un autre selon son type à savoir un capteur actif consomme davantage d'énergie qu'un capteur passif. En outre, la technologie de fabrication des batteries et leurs performances est un facteur qui doit être prise en considération où l'usure rapide demeure un facteur non négligeable. Toutefois, les expérimentations effectuées dans (Raghunathan *et al.* 2002) prouvent que la consommation d'énergie est extrêmement liée à la transmission. En effet, le coût d'une transmission d'un bit en énergie est équivalent à celui du calcul d'un millier d'opérations (Pottie & Kaiser 2000). Cela-dit, l'implémentation des techniques de gestion de flux et de choix des chemins optimaux est un apport considérable dans la conservation d'énergie des nœuds dans le réseau.

3.9.2 Surconsommation d'énergie

La surconsommation d'énergie est la consommation inutile qu'on peut éviter pour un nœud-capteur. Cette surconsommation peut être causée par une erreur de détection ou dans le cas d'une fréquence d'échantillonnage non contrôlée (Alippi *et al.* 2007). La partie transmission est affectée par plusieurs sources de communication, notamment dans le cas de l'accès au médium sans fil. Au niveau MAC, plusieurs phénomènes peuvent être une source de consommation, comme est stipulé dans (Ye *et al.* 2004; Ali & Sai Kumar 2008; Karl & Willig 2007) :

- Les collisions : elles apparaissent dans le cas de la transmission simultanée de deux trames par deux sources différentes. Le retransmission engendre une consommation supplémentaire. Diverses mécanismes au niveau MAC, cherchent à minimiser ses collisions.
- L'interception des paquets destinés aux autres : cette situation s'appelle l'overhearing et peut engendrer une grande consommation en énergie, surtout dans le cas des réseaux denses.
- Réception des paquets de contrôle : Les paquets de contrôle ou ce qu'on appelle l'overhead, consomme énormément d'énergie, notamment lors de l'implémentation des mécanismes implémentant plusieurs types de paquets de contrôle. (Kacimi 2009)
- Le récepteur n'est pas prêt : ce phénomène apparaît quand un émetteur envoie des paquets à un récepteur qui n'est pas prêt à les recevoir. Ce phénomène est baptisé dans le jargon des réseaux par l'overmitting.
- L'écoute à vide (idle listening) : comme a été déjà discuté, le mode idle consomme inutilement de l'énergie car le nœud reste à l'écoute du réseau sans recevoir de l'information. Ceci se présente comme étant une source de surconsommation de l'énergie, sachant qu'aucune activité n'est en cours.

3.10 CONSERVATION D'ÉNERGIE ET QoS

Bien que la conservation demeure un axe de recherche à part entière, il est étroitement lié à la QoS dans un réseau ad hoc mobile. En effet, la capacité d'énergie d'un nœud devra être conservée le plus longtemps possible pour pouvoir appliquer les critères de QoS exigés par les applications et les utilisateurs. Un nœud fortement sollicité pour interconnecter ses voisins épuiera rapidement son énergie et pourra provoquer des trous dans le réseau. Comme a été déjà évoqué, les expérimentations montrent que c'est la partie transmission qui épuise la batterie des nœuds capteurs. La consommation dans ce cas peut être divisée en trois parties, à savoir : détection, traitement et communication. Autrement dit, les mécanismes de conservation d'énergie visent deux parties principales :

- La nature intrinsèque de nœud mobile : Le développement d'outils d'optimisation du traitement de l'information par chaque nœud (détection, échantillonnage, mémoire... etc).
- La partie réseau : Implémenter des mécanismes et des algorithmes d'optimisation de l'énergie dissipée dans le réseau entier (MAC, routage... etc).

La durée de vie d'un réseau ad hoc mobile est conditionnée par l'implémentation des outils conjoints, traitant à la fois la nature des nœuds mobiles et leur mise en réseau ([Anastasi et al. 2009](#)).

A cet effet, plusieurs techniques ont été envisagées afin de pallier aux deux contraintes précitées. Dans ce qui suit, nous allons discuter quelques-unes. Ces techniques ont été implémentées dans toutes les couches du modèle OSI, identiquement à celles discutées dans la partie QoS.

3.10.1 Techniques du Duty-cycling

Cette technique a été largement implémentée dans les réseaux de capteurs et les réseaux sans-fil en général à faible activité et à faible contrainte de temps réel. Elle vise à éteindre le nœud ou le mettre en mode veille (low-power), dès qu'il n'a pas de données à transmettre. Toutefois, la radio doit être prête dès qu'un paquet est prêt pour être envoyé et reçu. Cette alternance entre les deux modes fonctionnement et low-power est baptisée "duty-cycle". Dans ([Kacimi 2009](#)), le duty-cycle est défini comme étant la marge de temps d'activité des nœuds. Cette technique doit implémenter des algorithmes d'ordonnancement "sommeil/réveil", permettant aux nœuds d'informer leurs voisins de leurs périodes d'activité et de sommeil. De cette manière, les nœuds du réseau peuvent agencer leurs périodes sommeil/réveil pour pouvoir rendre possible la transmission des paquets data.

3.10.2 Protocoles Sleep/Wakeup

Comme déjà discuté, l'ordonnancement sleep/Wakeup peut être implémenté via des protocoles opérant au niveau des couches supérieures (réseau ou application) ([Armstrong 2005](#)). Ces protocoles peuvent être classés en trois catégories : à la demande, rendez-vous programmés, asynchrones.

- Dans les protocoles à la demande, l'idée est de réveiller le nœud juste s'il a une demande de connexion par un autre nœud. Pour se faire, on envisage d'implémenter plusieurs radios dans un nœud de différentes consommations et de différents débits. La radio de faible consommation sera utilisée pour réveiller le nœud, puis la radio à forte consommation et débit prendra le relais. C'est le cas du protocole STEM (Sparse Topology and Energy Management) (Schurgers *et al.* 2002).
- Les protocoles à rendez-vous programmé, vise à réveiller les nœuds en même temps que ses voisins. Cela exige d'implémenter un ordonnanceur sleep/Wakeup pour pouvoir synchroniser les deux états des nœuds dans réseau.
- Les protocoles asynchrone; n'implémente aucun ordonnancement sleep/Wakeup et les nœuds balances indépendamment entre les deux états. Ces prtocolos ont été proposés dans(Zheng *et al.* 2003) .

3.11 CONSERVATION D'ÉNERGIE AU NIVEAU MAC

Une multitude de protocoles de conservation d'énergie au niveau MAC ont été proposés dans la littérature (Fakihf *et al.* 2008). Ces protocoles visent la gestion d'énergie plutôt que sur les techniques l'accès au canal radio. Ces protocoles peuvent être classés en trois parties principales à savoir :

3.11.1 Les protocoles fondées sur les techniques TDMA (Time Division Multiple Access)

(Rajendran *et al.* 2003) Dans cette approche le temps est divisés en un certain nombre de time-slot distribués sur les nœuds via un mécanismes de répartition. Chaque utilise ces time-slot pour émettre et recevoir ses données. Dans ces cas, l'architecture du réseau respect une certaine hiérarchie et les nœuds forment des clusters qui sont gérés par un nœud cluster-head, responsable de diviser les time-slots sur les nœuds qui lui sont rattachés. Plusieurs protocoles implémentent cette approche, comme Bluetooth, LEACH, Enregy Ware TDMA- based MAC... etc. Le protocole TRAMA (Rajendran *et al.* 2003), quant à lui, divise le temps en deux parties, un accès déterministe et un autre aléatoire. Ce dernier est utilisé pour la répartition des time-slots sur les nœuds. Tandis que l'accès déterministe est utilisé par les nœuds pour transmettre les paquets data via les time-slots qui lui sont alloués. Les protocoles TDMA demeurent efficaces en énergie car les nœuds ne s'allument que pour transmettre les données dans leur time-slots. Toutefois, ils présentent beaucoup d'inconvénients (Rhee *et al.* 2008), notamment dans la complexité des mécanismes de réservation des slots qui deviennent très complexes, surtout quand le réseau devient dense ou l'architecture du réseau évolue constamment. La synchronisation est aussi un facteur critique à prendre en considération dans les mécanismes d'allocation des time-slots. Toutes ces contraintes font que les techniques avec accès TDMA ne sont pas fréquemment utilisées dans le cas des réseaux ad hoc mobiles.

3.11.2 Protocoles MAC avec contention

Cette catégorie est plus populaire que la précédente, notamment dans les réseaux de capteurs sans fil. Ils implémentent des mécanismes de duty-cycle. Dans (Polastre *et al.* 2004), un exemple de protocole appelé B-MAC (MAC Berkeley), implémentant une technique d'écoute périodique du canal appelée LPL (Low Power Listening). Dans ce cas, le nœud se réveille périodiquement et reste actif pour attendre une transmission ou réception. La période entre deux réveils est nommée intervalle de vérification. Les trames B-MAC implémentent un long préambule qui est égal à l'intervalle de vérification, afin de permettre à un nœud de détecter une éventuelle transmission au cours de cet intervalle. Toutefois, cette méthode nécessite une synchronisation entre les nœuds. Une autre variante communément utilisés dans les réseaux de capteurs, baptisée S-MAC pour Sensor-MAC (Ye *et al.* 2004). Il implémente une stratégie de planification par rendez-vous. Des paquets de synchronisation sont échangés entre les nœuds pour agencer les périodes de sleep-wakeup. S-MAC implémente la notion de cluster virtuel pour regrouper les nœuds voisins dans un plan au moyen d'un algorithme distribué. De ce fait, le réseau sera réparti en plusieurs clusters virtuels appartenant à différents plans, à condition que les plans ne chevauchent pas. D'autres paquets de contrôle sont échangés entre les nœuds durant la période d'écoute, afin de pallier au problème de collisions. La communication s'effectue entre les nœuds qui désirent transmettre des données. Les autres nœuds peuvent dormir jusqu'à la prochaine période d'écoute. Les paramètres de S-MAC demeurent constants et ne changent pas après la période de déploiement. Dans [82], une autre version améliorée de S-MAC a été proposée, baptisée Timeout S-MAC et permettant une charge de trafic variable. Les approches implémentant une stratégie de duty-cycle dans la couche MAC demeurent efficaces dans la gestion de l'énergie. Toutefois, le sommeil d'un nœud pose un réel problème. Le nœud émetteur doit attendre le réveil du récepteur pour pouvoir transmettre ses données. Cette latence est d'autant plus importante que la charge du réseau évolue et le nombre de sauts devient important. Pour cette raison, les mécanismes S-MAC et T-MAC limitent le nombre de sauts entre les nœuds capteurs. La norme IEEE 802.15.4 (Van Den Bossche 2007) est destinée pour des réseaux à faible débit et faibles puissances. Elle définit des réseaux PAN (Personal Area Network), qui sont désormais des réseaux très répandus. Le PAN définit une architecture centralisée avec un PAN coordinator qui gère l'ensemble du réseau et un ou plusieurs coordinateurs qui gèrent les sous-ensembles des nœuds du réseau. Plusieurs topologies peuvent être envisagées avec les PAN, comme l'étoile, le cluster-tree ou le mesh. La norme IEEE 802.15.4 inclut des mécanismes de conservation d'énergie basés sur le duty-cycle. Pour se faire, une supertrame est définie et consiste en deux périodes : active et inactive. La période active inclut la communication du coordonnateur avec les nœuds qui lui sont associés. Cette période est divisée en deux autres périodes : CAP (Contention Access Period) et CFP sans contention. Durant la période CAP, un mécanisme de CSMA/CA est utilisé pour permettre l'accès au canal. Toutefois, durant la CFP, un nombre de slots garantis (GTS), sont

alloués pour chaque nœud. La période inactive définit un mode de faible consommation afin d'économiser l'énergie des nœuds.

Les mécanismes à contention demeurent trop efficaces en termes de délais et peuvent être utilisés pour des réseaux denses et à fort trafic, comparés à ceux reposant sur TDMA. Par contre, les collisions et la contention affecte le phénomène de conservation d'énergie. D'autres mécanismes de niveau supérieur peuvent être implémentés afin de minimiser la surconsommation et rendre efficace ces mécanismes à contention.

3.11.3 Protocoles MAC hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux techniques TDMA Et avec contention (CSMA). Z-MAC(Rhee *et al.* 2008) est l'une des variantes de ce type de protocoles. Z-MAC, commence par une période de découverte du réseau, où chaque identifiara ses voisins à 2 sauts. Ensuite, une algorithme sera appliqué pour distribuer les time-slots sur les nœuds, de sorte que deux nœuds voisins ne peuvent être affectés au même time-slot. De cette manière, une transmission d'un nœud vers un voisin d'un saut ne s'interfère pas avec ses voisins à deux sauts. Une fois la première étape accomplie, les nœuds du réseau demeurent prêts pour accéder au canal. Dans ce cas, les nœuds se trouvent en mode LCL (Low Contention Level) ou HCL (High Contention Level). Dans ce dernier mode, les nœuds propriétaires des time-slots et leurs voisins à deux sauts sont autorisés à accéder au canal. Dans le mode LCL, les nœuds peuvent concourir pour transmettre dans n'importe quel time-slot, mais la priorité est attribuée à ceux qui sont propriétaires des time-slots. De cette manière, le protocole Z-MAC optimise l'accès au canal, car la probabilité d'accès est augmentée. Les protocoles hybrides héritent les avantages des deux premières approches : TDMA et avec contention. Toutefois, ils sont très complexes à déployer, notamment dans le cas des réseaux de forte densité des nœuds.

3.12 ROUTAGE ET CONSERVATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX AHWSN

Cette partie a suscité l'intérêt des chercheurs, où une panoplie d'algorithmes ont été développés dans ce volet. Dans la couche réseau, les protocoles de routage visent à trouver les moyens efficaces afin de router les paquets data avec une consommation optimale de la batterie des nœuds, sachant que la grande consommation réside dans la transmission. Aussi, la conservation d'énergie implémentée dans les protocoles de routage vise essentiellement à prolonger la durée de vie des réseaux AHWSN. De même que dans le cas de la QoS, les mécanismes développés se basent essentiellement sur les protocoles de routage de best effort, déjà conçus pour les réseaux MANETs. Plusieurs paramètres ont été pris en considération dans ces mécanismes de conservation d'énergie. Par exemple dans (ABDELLAOUI 2018), les auteurs ont proposés une extensions du protocole OLSR en mettant à jour le processus d'élection des nœuds MPR, en implémentant un modèle de mobilité basé sur la stabilité de la relation spatiale entre les nœuds mobiles. Dans(Purnama & Purnomo 2018),

les auteurs ont implémentés un algorithme original baptisé " min-max " pour la sélection des nœuds MPRs afin de réduire les paquets de contrôle qui sont diffusés dans le cas de l'OLSR basique. D'autres algorithmes génétiques ont été implémentés pour rendre efficace la conservation d'énergie implémentant le protocole OLSR (Fardin Far & Alaei 2018).

D'autres protocoles utilisent des stratégies différentes dans le calcul de la table de routage des nœuds, tels que la hiérarchisation du réseau sous forme de clusters, à l'exemple de LEACH qui utilise le cluster-head pour router les paquets data entre les nœuds.

Des approches efficaces visant à minimiser l'inondation du réseau par les paquets de contrôle, en diffusant l'information des énergies des nœuds dans le calcul des tables de routage. Ces approches sont très efficaces et seront discutées dans le chapitre suivant. Dans ce qui suit, nous étalons quelques approches usuelles traitant le problème de la conservation d'énergie dans les réseaux AHWSN en général.

3.12.1 EARLEAHSN (Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks)

est un algorithme utilisant un ensemble de sous-chemins optimaux afin d'accroître la durée de vie d'un réseau AHWSN (Younis *et al.* 2002). L'élection des chemins s'effectue par le biais d'une fonction probabilistique dépendant de la consommation de l'énergie tout au long d'une route. L'algorithme évite l'utilisation en permanence d'une route économe en énergie afin d'éviter l'épuisement des nœuds la constituant. De ce fait, la vie entière du réseau sera prolongée. L'algorithme adresse chaque nœud par une classe comprenant l'emplacement du nœud et sa capacité.

3.12.2 EARCBSN (Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks)

Comme son nom l'indique, l'approche (Shah & Rabaey 2002) propose un algorithme de routage hiérarchique basé sur une architecture à trois niveaux pour les réseaux de capteurs. Les nœuds capteurs sont regroupés en clusters et sont connectés à des cluster-heads, ayant des performances supérieures et jouant le rôle de passerelles. Les cluster-heads sont responsables de router les paquets entre les autres nœuds cluster. Les cluster-heads doivent disposer des informations nécessaires au routage telles que : l'état du nœud, sa position, son énergie résiduelle (Meraihi *et al.* 2003). Les cluster-heads agissent comme gestionnaires de cluster. Responsables au routage de l'information, ils doivent procéder au contrôle de la latence du cluster et arbitrent les accès entre les capteurs. Ils peuvent aussi reconfigurer le réseau afin de pouvoir augmenter la durée de vie du réseau.

3.12.3 GBR (Gradient-Based Routing)

L'algorithme (GBR) (Schurgers & Srivastava 2001), définit le routage par gradient qui est une version modifiée de la diffusion dirigée. L'idée est de réduire la diffusion des paquets à un certain nombre de sauts depuis le nœud émetteur. Le nombre de saut dans cette approche est appelé " hauteur du nœud ". La différence entre les hauteurs des nœuds voisins

est définie comme étant le gradient sur le présent lien. La transmission sera effectuée en utilisant les chemins de plus haut gradient. Cette approche implémente des techniques d'agrégation des données menant à un équilibrage du trafic dans le réseau. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories :

- Schéma stochastique : quand deux sauts ou plus ont le même gradient, le nœud choisit hasardeusement l'un d'eux.
- Schéma basé sur l'énergie : quand l'énergie d'un nœud diminue au-dessous d'un seuil donné, l'algorithme augmente sa hauteur afin que les autres nœuds se découragent de lui transmettre leurs données.
- Schéma basé sur le flux : les nouveaux flux seront redirigés vers d'autres chemins pris initialement par les flux précédents. Ceci a pour fin de répartir la charge sur les nœuds capteurs afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Cette technique d'équilibrage de charge est appliquée par plusieurs protocoles de routage pour augmenter leurs performances (Yousef 2010)

Plusieurs autres mécanismes sont développés dans la partie routage, en se basant sur la topologie du réseau, l'état des liens, la localisation des nœuds... etc.

3.12.4 Conservation d'énergie au niveau transport

Au niveau transport, un protocole communément utilisé pour la vérification de la transmission de l'information entre les nœuds qui est TCP (Transmission Control Protocol). Ce dernier a été conçu pour les réseaux filaires et des expérimentations ont été menées dans (Sailhan 2005) pour évaluer ses performances dans le cas des réseaux AHWSN. Dans (Agrawal & Singh 2001), les faibles performances de TCP dans les réseaux ad hoc sont principalement causées par :

- Les délais importants dans les protocoles de routage réactifs afin dans le processus de l'établissement des routes.
- Ruptures des routes à cause de la topologie du réseau.
- La surcharge du réseau causée par les paquets de contrôle des protocoles de routage.

Dans (Ahuja *et al.* 2000), les performances mesurées de TCP, sont liées à l'efficacité du protocole de routage implémenté. En effet, l'association de TCP avec un protocole de routage proactif demeure offre une meilleure efficacité qu'avec un protocole réactif. Additivement, les mécanismes de contrôle de flux implémentés par TCP dans le cas des réseaux filaires ne sont plus adaptés aux réseaux ad hoc mobiles affectés par des déconnexions fréquentes à cause de la topologie évolutive du réseau. Afin de pallier à ce problème, des mécanismes ont été implémentés pour différencier les erreurs de congestion des autres erreurs. Dans (Holland & Vaidya 1999), la distinction entre les erreurs est effectuée par l'implémentation d'un mécanisme appelé ELN (Explicit Loss Notification), permettant de ne pas appliquer des mécanismes de contrôle de congestion par l'expéditeur. Dans (Sailhan 2005), la solution envisagée est de suspendre toute transmission quand les performances du média sont dégradées (taux d'erreur important à cause du bruit de transmission). Une

fois les conditions redeviennent à la normale, les transmissions seront reprises. Afin de d'adapter des mécanismes de recouvrement d'erreur, en vue d'adapter le comportement de TCP vis-à-vis aux réseaux sans fil, plusieurs approches ont été proposées, en se basant sur :

- L'ajustement de la fenêtre de transmission en fonction des conditions de transmission.
- La retransmission rapide des segments erronés ou manquants
- Le réajustement dynamique des délais d'attente pour le retransmissions des paquets

Dans (Tsaoussidis *et al.* 2000), une observation a été effectuée sur le fait que TCP prenne du temps pour augmenter la fenêtre de transmission, contrairement à sa réduction. Ceci s'avère efficace dans le cas des réseaux filaires en vue de ne pas congestionner davantage les routeurs surchargés. Dans le cas des réseaux sans fil, des approches sensées ont été envisagées, visant à augmenter rapidement la taille de la fenêtre dès qu'il y a que la période caractérisée par un fort taux d'erreur arrive à terme (Tsaoussidis *et al.* 1999). Une autre approche dans (Singh & Singh 2002), implémentant des SACKs (Selective Acknowledgement), demeure adaptée aux réseaux sans fil et réduit efficacement la surconsommation d'énergie. Cette approche permet d'identifier avec précision les segments manquants et limite les retransmissions inutiles. En effet, additivement au ACKs classiques envoyés par la récepteur, un SACK est envoyé pour identifier le segment manquant. Ce SACK contient le numéro de séquence du segment reçu avant les segments manquant ainsi que le numéro de séquence du segment immédiatement reçu après les segments manquants. L'émetteur sera rapidement notifié via ce SACK avant que tous les segments contenus dans une fenêtre de transmission ne soient émis.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étalé les principaux aspects liés à la qualité de service (QoS) dans les réseaux Adhoc mobiles, si nous voulons que ces derniers soient une continuité des réseaux filaires classiques. La QoS est définie globalement par le degré de satisfaction d'un utilisateur ou d'une application quant à l'utilisation d'un réseau donné et est vue comme un contrat signé entre l'utilisateur et le réseau. Elle est caractérisée par un ensemble de métriques et quantifiée sur différents échelles. Les performances du réseau et les contraintes liées à l'application demeurent les plus prépondérants dans la détermination d'un niveau de QoS. Avec les avantages qu'offrent les réseaux ad hoc mobiles et leur degré d'appartenance dans plusieurs secteurs, le déploiement de nouvelles applications dans ces réseaux représente plusieurs intérêts. Toutefois, les contraintes liées à l'infrastructure décentralisée d'un réseau ad hoc, la topologie en constante évolution due à la mobilité des nœuds, ainsi que les caractéristiques intrinsèques des dispositifs mobiles, doivent être pris en considération dans la détermination de la qualité de service de ces réseaux. L'amélioration des critères de la QoS dans de tels réseaux, incitent le développement de nouvelles approches adaptés aux contraintes qui y sont liées à plusieurs échelles, allant du médium à la couche application du modèle OSI. Les approches les plus communes ont été revues dans ce chapitre. Additive-

ment aux critères usuels de la QoS, tels que la bande passante, le délai, la gigue, un autre paramètre crucial touchant la stabilité et la pérennité des réseaux ad hoc mobiles qui est la conservation d'énergie. Cette caractéristique représente un élément clé dans la détermination de la QoS, sachant que les nœuds mobiles sont des dispositifs à batterie. L'architecture plate du réseau exige que tous les nœuds participent dans l'activité de transmission des données, ce qui nuit considérablement à la durée de vie du réseau. Ajouté à cela, la consommation d'énergie importante d'un nœud durant son activité de transmission qui affecte directement le niveau de sa batterie. A cet effet, plusieurs techniques de conservation d'énergie ont été revues dans ce chapitre, visant toutes les couches du modèle OSI (MAC, Réseau et transport). Il existe bien évidemment beaucoup d'autres techniques de conservation d'énergie. Par exemple, les paradigmes émanant de l'auto-organisation des systèmes, les mécanismes cross-layers et d'autres protocoles indépendants de niveau réseau ou de niveau application.

Dans la chapitre suivant, nous allons discuter nos contributions dans le domaine de la QoS et particulièrement la conservation de l'énergie au niveau de la couche réseau, en se basant sur un protocole de routage proactif, communément utilisé dans le domaine des réseaux ad hoc mobiles qui est OLSR. Les contributions visent à implémenter des algorithmes efficaces en énergie, en tenant compte de ce critère dans le processus de sélection des routeurs du réseau et dans le calcul des routes optimales. Ces nouvelles approches ont pour objectif principale d'équilibrer la charge sur l'ensemble du réseau afin de maximiser sa durée de vie.

NOUVEAU MECHANISME WRE (WEIGHTING ENERGY RECHABILITY), CONSERVATION D'ENERGIE ET ÉQUILIBRAGE DE CHARGE POUR LA QoS

4

SOMMAIRE

4.1	INTRODUCTION	73
4.2	RAISONS DU CHOIX DU PROTOCOLE OLSR	73
4.3	MOTIVATIONS ET DÉFIS	73
4.4	NOTION DES RELAIS MULTIPPOINTS (MPR) DANS LES RÉSEAUX ADHOC	74
4.4.1	Notations Mathématiques	75
4.4.2	MPR, optimisation de la diffusion et amélioration de la qualité de service	76
4.5	MPR ET QUALITÉ DE SERVICE	80
4.5.1	GE ₃	80
4.5.2	Calcul des routes à qualité de service	81
4.6	NOTION DE DURÉE DE VIE DE RÉSEAU	81
4.6.1	Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants	82
4.6.2	Durée de vie basée sur la couverture	82
4.6.3	Durée de vie basée sur la connectivité	83
4.6.4	Durée de vie basée sur les exigences de la qualité de service	84
4.7	PROTOCOLE WRE-OLSR	84
4.7.1	Messages de contrôle et algorithme d'inondation dans WRE-OLSR	84
4.7.2	Nouveau message HELLO dans WRE-OLSR	85
4.7.3	Sélection des MPRs dans le protocole WRE-OLSR	86
4.7.4	Démonstration	89
4.7.5	Nouvelle approche pour le calcul de l'ensemble MPR	89
4.7.6	Choix du paramètre de pondération entre l'énergie rési- duelle et la reachability w	91
4.7.7	Sélection du paramètre W	92

4.7.8	Métriques d'évaluation	94
4.7.9	Paramètres de simulation	95
4.7.10	Résultats et discussions	97
4.7.11	Evaluation des paramètres de QoS	97
4.8	PROTOCOLE WRE-OLSR+	103
4.8.1	Nouvelle fonction pour calculer le paramètre de pondération w	107
4.8.2	Résultats et discussions	108
4.8.3	Évaluation des paramètre de la QoS	110
4.9	CONCLUSION	116

4.1 INTRODUCTION

Garantir une qualité de service est très essentiel afin d'améliorer le rendement d'un réseau de communication. Les différentes contraintes liées aux réseaux adhoc mobiles compliquent la mise en œuvre et la garantie des différents critères de la qualité de service. Pour cela plusieurs protocoles de routage pour les réseaux adhoc mobiles ont été proposés avec des mécanismes afin d'assurer et d'améliorer les différents critères de la qualité de service (Ehrgott 2005). Dans ce chapitre une nouvelle version d'OLSR a été proposée afin d'améliorer plusieurs critères de la qualité de service. A cet effet, ce chapitre expose ; en premier lieu les causes principales du choix du protocole OLSR, en suite, en deuxième lieu la version d'OLSR standardisée ainsi que les heuristiques de choix des MPR et quelques algorithmes assurant la QoS, puis en troisième lieu, ce présent chapitre détaille notre nouvelle version d'OLSR et les différentes améliorations apportées à l'heuristique du choix des MPR ainsi que les fondements mathématiques sur les quelles on s'est basé. En fin, l'influence de ces changements sur les différents critères de la qualité de service a été présentée, tout en comparant avec l'OLSR standardisé RFC 3626.

4.2 RAISONS DU CHOIX DU PROTOCOLE OLSR

Le protocole de routage OLSR est le fruit de six années de travail dans le cadre de l'équipe de recherche d'HIPERCOM de l'INRIA, il a été normalisé par l'IETF dans la RFC3626 (Clausenet al.2003). Le choix du protocole OLSR a été basé, essentiellement sur les avantages qu'il peut offrir pour les réseaux adhoc mobiles autant que protocole proactif, si comparé avec d'autres protocoles de routage. Ce protocole ; permet d'intégrer une technique d'optimisation (technique des MPR *Multipoint Relay*) qui minimise l'inondation du trafic de contrôle et ainsi économiser la bande passante et l'énergie ; offre tous les avantages des protocoles à état de lien tout en ayant des informations de routage sur tous les nœuds du réseau ; mais aussi gère la topologie du réseau à travers les messages TC (*Topology Control*) qui sont diffusés périodiquement. L'OLSR prend en compte aussi l'utilisation des interfaces multiples en utilisant les messages MID. De même ce protocole est très utilisé dans le domaine de routages dans les réseaux adhoc mobiles à cause de son efficacité dans le cas des réseaux denses et à forte mobilité (Belkheir 2015). De ce fait, il a été l'objet de plusieurs travaux et études de recherches qui visent à améliorer certains paramètres à l'instar de l'énergie et la sécurité (Sondi-Obwang 2010b) (Saddiki et al. 2017).

4.3 MOTIVATIONS ET DÉFIS

Les MPR représentent un élément clé et qualifié comme point fort dans le protocole OLSR, ainsi ils permettent d'optimiser le nombre de messages lors du processus de diffusion. Inversement, ses nœuds représentent un point faible du fait que dans le cas où un point MPR tombe en panne, cela engendre une paralysie d'une partie des réseaux jusqu'à son remplace-

ment. Le choix des MPR ressemble au problème de l'ensemble dominant qui est un problème connu dans la théorie des graphes, c'est un problème NP complet (Naimi 2015). À cet effet, plusieurs heuristiques ont été proposées dans la littérature scientifique dont le but de sélectionner le meilleur ensemble MPR, est pour minimiser l'inondation, est pour améliorer certains critères tels que la qualité de services ou bien la conservation de l'énergie (Sondi-Obwang 2010b). Ces heuristiques seront détaillées dans la section suivante. Aussi, l'OLSR basique montre en termes de sécurité une vulnérabilité perceptible faisant l'objet de plusieurs thèmes de recherches, s'ajoutant toujours le problème de consommation d'énergie du fait que le protocole OLSR ne prend pas en considération la consommation d'énergie comme un critère prépondérant dans la gestion de la topologie du réseau et le calcul des MPRs, ce qui est aggravé par la capacité énergétique des nœuds limitée à cause de l'utilisation des piles et batteries, d'où la nécessité de prendre en considération ce paramètre lors du développement d'un protocole de routage à qualité de service. À cet effet, plusieurs travaux de recherche sont apparus dans le but d'optimiser la consommation énergétique des nœuds à travers l'utilisation des techniques de conservation innovantes afin d'améliorer les performances du réseau, notamment la maximisation de sa durée de vie (Belkheir *et al.* 2015). Dans cette optique, la présente étude propose une nouvelle solution pour optimiser la consommation d'énergie dans le protocole OLSR visant à améliorer la performance de ce protocole en termes de QoS en faisant intégrer un nouveau mécanisme de choix des MPR basé sur une pondération entre le degré du nœud définissant la position stratégique du nœud dans le réseau en mesurant le nombre de connexions qu'il détient avec les autres nœuds et son énergie résiduelle. Ces performances seront quantifiées et démontrées en se basant sur le simulateur NS2 comme moyen très répandu dans le domaine des réseaux adhoc mobiles et les réseaux AHWSN.

4.4 NOTION DES RELAIS MULTIPPOINTS (MPR) DANS LES RÉSEAUX ADHOC

Le routage dans les réseaux adhoc est réalisé de façon distribuée par tous les nœuds du réseau MANET, une particularité en outre de la mobilité et les ressources limitées des nœuds en termes d'énergie, de capacité de calcul et de stockage. Ce qui conduit à l'obligation de faire appel à des algorithmes autres que ceux basés sur la gestion centralisée du réseau. Dans l'OLSR chaque nœud sélectionne un sous-ensemble de ses voisins direct pour les utiliser comme intermédiaires afin de communiquer avec ses voisins à deux sauts (Clausen *et al.* 2003). L'ensemble des voisins direct choisis par chaque nœud suivant ce mécanisme s'appelle l'ensemble MPR qui sera seul le responsable de retransmettre les paquets de donnée et de contrôle de topologie TC. L'utilisation de cette technique permet d'optimiser l'effet du Broad-casting tout en optimisant l'utilisation de la bande passante, et par conséquent ceci à un impact positif sur la performance du protocole. Le choix des MPR étant un problème NP complet qui nécessite le recours à des méthodes approchées sous forme d'heuristique faisant appel au problème de l'ensemble dominant (connected Dominationg sets).

Ce problème consiste à sélectionner le minimum de voisins à un saut qui permet à un nœud de communiquer avec ses voisins à deux sauts. L'optimisation obtenue par l'usage de l'ensemble MPR est plus importante que le nombre des MPR choisis par chaque nœud ; il y a une forte dépendance entre le protocole OLSR et la technique MPR et par conséquent les différentes tentatives de remplacer les MPR dans OLSR par une autre méthode ont conduit à des résultats moins performants (Guo & Yang 2007). D'où le besoin nécessaire d'optimiser au maximum la diffusion par des algorithmes légers qui s'adaptent au facteur de passage à l'échelle et aussi l'essai de converger vers le minimum d'MPR possible. Les nœuds MPR sont les seuls autorisés à retransmettre les paquets de contrôle de la topologie TC, ainsi ces paquets sont responsables de la description de la qualité des liens qui relie les différents MPR avec les nœuds qui l'on choisit comme MPR, cet ensemble est baptisé MPR sélecteur (Clausen *et al.* 2003). Chaque nœud utilise les informations transmis dans les paquets TC afin de concevoir sa propre vue sur la topologie de réseau et de construire aussi sa propre table de routage, de cela vient l'importance du choix de ces nœuds MPR jouant un rôle majeur pour assurer un certain degré de qualité de service. Donc, une grande importance doit être donnée au préalable au processus de sélection des MPR. autrement dit, les MPR ont un grand intérêt dans le processus de la qualité de service dans le protocole OLSR, de même les critères de la qualité de service doivent être pris en compte lors du processus de sélection. Ce après quoi, plusieurs algorithmes sont disponibles dans la littérature scientifique, pour la sélection des MPR, proposés soit dans le but d'optimiser la diffusion soit pour garantir une qualité de service. Ces derniers appliqués sur le protocole OLSR seront cités dans les sections ci-après.

4.4.1 Notations Mathématiques

Dans le but d'unifier la représentation mathématique dans les différentes heuristiques, il est indispensable de citer quelques notations mathématiques (définitions mathématiques) utilisées dans les différents algorithmes. Tous d'abord, un réseau adhoc est représenté mathématiquement par un graphe $G(N, L)$ où N représente l'ensemble des nœuds et L représente l'ensemble des liens, chaque nœud N choisit indépendamment son ensemble MPR parmi ses voisins à un saut afin de pouvoir communiquer avec le reste de son voisinage indirect au sein du même réseau. Ensuite, les deux notations mathématiques 4.1 et 4.2 définissant, respectivement, le voisinage à un saut ($N1i$) et à deux sauts ($N2i$) d'un nœud i .

$$N^1(x) = j \in \{V : (i, j) \in E\} * \quad (4.1)$$

$$N^2(i) = \bigcup_{j \in N(i)} N^1(j) - N^1(i) - \{i\} \quad (4.2)$$

Puis, la définition mathématique de degré du nœud i qui est donnée par la notation 4.3, et qui représente réellement le nombre de liens établis avec le voisinage et mathématiquement le nombre d'arcs, soit entrant, soit sortant du nœud i . Ce dernier, il comporte un degré positif ($d+$) et un degré négatif ($d-$)

$$d(i) = |\{x \in N_1(i) : (i, x) \in E\}| + d(x) \quad (4.3)$$

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 $N_1(i)$. et en fin, la notation mathématique MPR_i , qui définit l'ensemble des MPR sélectionnés par le nœud i .

4.4.2 MPR, optimisation de la diffusion et amélioration de la qualité de service

les algorithmes de sélection des MPR ont été sujet de plusieurs études, dont certaines ont proposé de réduire le nombre des MPR pour optimiser la diffusion (le simple greedy), d'autres chercheurs en plus de l'optimisation cherchent à renforcer la stabilité du réseau en introduisant un nouveau critère dénommé Willingness (RFC 3626) qui représente l'aptitude des nœuds à être des MPR. Néanmoins, d'autres recherches visent à améliorer le paramètre taux de paquets délivrés du réseau en essayant d'assurer une probabilité minimale de transmission des paquets (le MAXP), d'autre encore cherchent à sélectionner des MPR qui assure les routes avec le maximum de débit (GE₃).

4.4.2.1 Simple greedy (SG)

Cette heuristique est la première qui a été proposée afin d'implémenter la technique des relais multipoints à l'aide de l'adaptation de la solution du problème de l'ensemble dominant minimum *Set Covering Problem* (MSCP), développer initialement dans la théorie des graphes et appliquer au réseau adhoc mobile. Ceci a été dans le but de couvrir la totalité des nœuds à deux sauts $N_2(i)$ par le choix d'un minimum de nœuds du voisinage à un saut $N_1(i)$. Pour atteindre ce but, chaque nœud i sélectionne à plusieurs étapes les nœuds de son voisinage $N_1(i)$ ayant le maximum de connexion avec les nœuds à deux sauts, encore, non couvert noté au sein de l'algorithme par $N_2(i)$ (Qayyum *et al.* 2000; Chvatal 1979). L'avantage de cette heuristique réside dans sa rapidité, même pour les réseaux de grande densité d'une complexité de l'ordre de $O(m^2)$ en temps avec m est le degré maximum d'un nœud du réseau. Aussi, elle réside dans la sélection d'un nombre d'MPR proche du minimum théorique avec un écart de l'ordre de $\log m$ (Qayyum *et al.* 2002). Par ailleurs les travaux de (Mans *et al.* 2004) confirment que le simple greedy génère un nombre des MPRs plus proche au minimum, et par conséquent, ceci minimise le taux de retransmissions des paquets.

Toutefois, cette heuristique affiche, un premier défaut résultant de la sélection des MPR uniquement sur la base des degrés des nœuds et la non-stabilité surtout observée dans les réseaux adhoc et AHWSN mobiles et utilisant des ressources énergétiques limitées. Un deuxième défaut, a été signalé, représenté par un taux plus élevé de paquets non reçus par les destinataires à cause des collisions au niveau d'un nœud récepteur du même paquet envoyé par deux MPR différents. Ce après quoi, et à titre d'exemple, plusieurs variantes ont été proposées en introduisant des

poids qui permettent d'évaluer la qualité des liens lors de la sélection des MPR, dont deux variantes paraissent intéressantes, notamment, l'heuristique RFC 3626 et le MAXP (Murray *et al.* 2010; Sondi-Obwang 2010b)

Algorithme 2 : Simple Greedy

Entrées : $N^1(i)$, $N^2(i)$

Début

$MPR_i = \emptyset$;

Etape 1 :

$N^2(i) = N^2(i)$;

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : \exists k \in N^2(i), (j, k) \in E \text{ ET } \{(q, k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\} | l = 1\}$;

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$;

Etape 2 :

while $N^2(i) \neq \emptyset$ **do**

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : | \{(j, k) \in E : k \in N^2(i)\} | l = \text{MAX} \{ | \{(o, p) \in E : p \in N^2(i)\} |, \forall o \in (N^1(i) \setminus MPR_i) \} \}$;

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(j)$;

La première variante, celle de la RFC 3626 qui a été détaillée dans le standard RFC décrivant le protocole OLSR, est une heuristique avec l'ajout de la notion de Willingness. Cette dernière métrique a été proposée afin de donner à chaque nœud un poids qui représente la capacité d'un nœud x à être un relais multipoints. Bien que, la signification de cette métrique est laissée ouverte en raison de l'existence de différentes possibilités de cette aptitude, La RFC a cité un exemple dans lequel le willingness peut prendre une valeur de 0 à 7, avec comme remarque les nœuds possédant un willingness égal à 0 sont considérés will never, ceux possédant une valeur égale à 7 sont considérés comme will always et le reste est classés par ordre décroissant. Le willingness dans cette avancée représente le niveau de batterie du nœud. Dans ce cas, une certaine stabilité est donnée au réseau en favorisant les nœuds ayant une capacité de batterie plus importante. En effet, l'introduction de la notion de willingness comme paramètre principal du choix des MPR a fait perdre à l'heuristique RFC 3626 une caractéristique très essentielle des heuristiques dérivées du simple greedy, celle de garantir un écart borné par rapport au nombre minimum de MPR. De plus, le choix direct des nœuds ayant un willingness égal à 7 a conduit à l'augmentation du nombre des MPR et par conséquent à une divergence du minimum théorique. Par contre, l'élimination directe, de la compétition des MPRs, des nœuds avec une valeur de Willingness égale à 0, a été utile pour les nœuds qui ont une capacité critique d'énergie. Un inconvénient de l'heuristique simple greedy et que les nœuds a faible énergie peuvent être choisis comme MPR en se basant sur leur degré ce qui donne un risque de construire une structure éphémère, de courte durée, comparativement à RFC 3626 (Sondi-Obwang 2010b).

Il est important de souligner un inconvénient commun entre les deux algorithmes, le simple greedy et le RFC 3626, due à l'existence des nœuds supeflus choisis à cause de leur ordre arbitraire. C'est pourquoi, des nou-

velles versions des deux algorithmes ont été proposées spécialement dans le but de remédier à ce problème (Mans *et al.* 2004).

Algorithme 3 : 3626

Entrées : $N^1(i)$, $N^2(i)$

Début

$MPR_i = \emptyset$

Etape 1 : $N^2(i) = N^2(i)$

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : W(j) = 7\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$

Etape 2 :

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^2(i) \setminus MPR_i : \exists k \in N^2(i), (j, k) \in$

$E \text{ ET } |\{(q, k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\}| = 1\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$

Etape 3 : TANT QUE $N^2(i) \neq \emptyset$ FAIRE

$A = \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : W(j) = \text{MAX}\{W(x), x \in N^1(i) \setminus MPR_i\}\}$

SI $|A| > 1$ ALORS

$B = \{j \in A : |\{(j, k) \in E : k \in N^2(i)\}| = \text{MAX}\{|\{(o, p) \in E : p \in$

$N^2(i)\}|, \forall o \in A\}\}$

FIN SI

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in B : d^*(j) = \text{MAX}\{d^*(x), x \in B\}\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^2(j)$

FIN TANT QUE

L'utilisation d'un poids willingness dans l'algorithme de sélection des MPR RFC 3626 qui est un paramètre interne lié au nœud et non pas à son environnement, permet de favoriser par exemple, les nœuds ayant un état énergétique plus important afin d'avoir une configuration durable et stable du réseau. En revanche, de ce paramètre interne, un autre paramètre externe ; le degré a été utilisé dans l'algorithme simple greedy, de même, pour la sélection des MPR, mais de plus, pour optimiser la diffusion. Ce paramètre dépend de la position du nœud et des autres nœuds qui se trouvent dans sa zone de couverture.

Dans les heuristiques basées sur le simple greedy, un nœud X choisit ses MPR parmi leurs voisins situés généralement dans les limites de sa zone de couverture, puisque c'est eux qui sont plus proches des nœuds à deux sauts et auront plus de chance pour les couvrir. Ce phénomène influence sur le nombre de paquets transmis avec succès puisque la qualité de la communication dépend de l'atténuation du signal relatif à la distance entre la source et la destination. La probabilité qu'un paquet émis par un nœud i arrive avec succès à sa destination est plus grande, dans le cas où le nœud destinataire se trouve à l'intérieur qu'à l'extrémité de la zone de couverture (Ingelrest *et al.* 2007). Il est à noter que la cause principale d'augmentation du nombre de paquets perdus est que la plupart des MPRs choisis par les nœuds du réseau se trouvent dans l'extrémité de leurs zones de couvertures (Ingelrest *et al.* 2007; Mans *et al.* 2004).

L'heuristique Maxp qui veut dire maximiser la probabilité de transmission correcte, a emprunté la méthode de calcul de la probabilité de transmission à partir du modèle *log Normal shadowing* (LNS), utilisé afin de modéliser les transmissions en prenant en compte l'atténuation du si-

gnal dû à la distance entre la source et la destination et les obstacles, ce qui a facilité le calcul de la probabilité qu'un paquet soit transmis avec succès. Cette métrique pourra être prise en compte lors de la sélection des MPR (Stojmenovic *et al.* 2002)).

Dans cette dernière heuristique, et lors du choix des MPR les nœuds du voisinage à un saut sont classés sur la base de la probabilité de router les paquets avec succès afin d'améliorer la qualité de couverture du voisinage à deux sauts.

En plus de l'estimation de la probabilité, l'heuristique MAXP a été développée dans le but de garantir une probabilité minimale de transmission des paquets pour tous les nœuds de voisinage à deux sauts. Cet algorithme peut être facilement intégré dans l'OLSR basique. Dans cette variante, chaque nœud évalue les MPR en fonction de la probabilité d'acheminer les paquets au voisinage à deux sauts et continue de remplir sa table MPRs et même avec une redondance. Une telle redondance est utilisée pour d'atteindre une probabilité minimale de transmission de recevoir les paquets notés P_{min} . De même que la RFC 3626, le MAXP ne garantit pas un écart borné entre le nombre d'MPR choisis et le minimum théorique à cause de l'augmentation du nombre d'MPRs générée par la redondance. Cette augmentation est suite à l'ajout systématique des nœuds à l'ensemble MPR afin d'augmenter la probabilité de recevoir les paquets avec succès et atteindre le seuil minimal P_{min} . En plus, la redondance cause une augmentation des taux de collision au niveau du nœud de destination, ce qui nécessite le développement d'un mécanisme afin de remédier à ce problème.

L'algorithme MAXP était créé initialement pour augmenter la robustesse d'un réseau adhoc mobile en faisant le choix des MPR et exploiter la redondance dans le but de minimiser le taux de perte des paquets. Cet algorithme peut être classé dans la catégorie des algorithmes pour la qualité de service basé sur l'amélioration de la métrique Taux de perte (Ingelrest & Simplot-Ryl 2006).

Algorithme 4 : MAXP

Entrées : $N^1(i)$, $N^2(i)$, P_{min}

Début

$MPR_i = \emptyset$

Etape 1 : $N^2(i) = N^2(i)$

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : \exists k \in N^2(i), (j, k) \in E \text{ ET } |\{(q, k) \in E : q \in (N^1(i) \cap N^1(k))\}| = 1\}$

$N^2(i) = N^2(i) \setminus N^1(MPR_i)$

Etape 2 : TANT QUE $N^2(i) \neq \emptyset$ ET $MPR_i \neq N^1(i)$ FAIRE

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) \setminus MPR_i : S(j) = \text{MAX}\{S(x), x \in N^1(i) \setminus MPR_i\}\}$

POUR $q \in (N^1(j) \cap N^2(i))$ FAIRE

SI $(1 - \prod_{t \in N^1(q) \cap MPR_i} (1 - P(t, q))) \geq P_{min}$ ALORS

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

FIN SI

FIN POUR

FIN TANT QUE

4.5 MPR ET QUALITÉ DE SERVICE

La majorité des travaux ayant pour objectif l'amélioration de la qualité de service dans les MANET en utilisant OLSR comme protocole de routage ont proposé des nouveaux algorithmes de calcul de route comme solution pour assurer la qualité de service. Mais il existe peu de travaux ayant visés les algorithmes de sélection des MPR comme solution à la qualité de service, malgré que le choix de ces derniers sur la base des mêmes critères de la QoS est primordial vu l'importance de ces nœuds dans les différentes phases de la communication. Quelques algorithmes ont été développés à cet effet, à savoir le GE₃ qui est un algorithme basé sur une seule métrique qui est la bande passante et même d'autres basés sur plusieurs métriques à savoir l'algorithme proposé par (Badis & Al Agha 2005; Nguyen & Minet 2007) visant à choisir deux ensembles d'MPRs, l'un pour l'acheminement des données du *broadcasting* afin d'optimiser la diffusion et l'autre pour l'acheminement du trafic à qualité de service. Dans la majorité des travaux de recherche qui ont étudié le sujet de la qualité de service en utilisant le protocole OLSR, les auteurs proposent des algorithmes destinés beaucoup plus au routage avec qualités de service (Costa *et al.* 2002; Badis & Agha 2003). Mais, comme il a été déjà mentionné, la sélection des MPR sur la base des mêmes métriques de qualité de service visé, est une étape primordiale vu l'importance que jouent ces nœuds dans les différentes phases de communications.

4.5.1 GE₃

L'idée de cet algorithme est de sélectionner des MPR dans le but d'atteindre les nœuds à deux sauts en utilisant les liens qui assure le maximum de bandes passantes (Baccelli *et al.* 2009). Notant par $B(x, y)$ le débit assuré en utilisant le lien entre les deux nœuds x et y . Lorsque l'heuristique GE₃ est utilisée comme algorithme de sélection des MPR, tous les nœuds choisis les MPR qui assure le débit maximal afin d'atteindre leur voisinage à deux sauts.

Algorithme 5 : GE₃

Entrées : $N^1(i), N^2(i),$

Début

$MPR_i = \emptyset$

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

$MPR_i = MPR_i \cup \{j \in N^1(i) : \text{MIN}\{B(i, j), B(j, q)\} =$
 $\text{MAX}\{\text{MIN}\{B(i, x), B(x, q)\}, x \in N^1(i)\}\}$

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

FIN POUR

Chaque nœud construit sa table de routage à l'aide des informations que contiennent les messages TC. Ces informations décrivent les liens qui existent entre les différents nœuds et leur MPR sélecteur et ce sont les mêmes liens utilisés pour calculer les routes à qualité de service. Les nœuds du réseau utilisent les messages TC afin d'avoir des informations sur la qualité des liens menant à tous les autres nœuds du réseau à l'exception des nœuds à un et à deux sauts.

Dans les études proposées par (Badis & Al Agha 2005; Nguyen & Minet 2007) l'idée consiste à utiliser deux ensembles d'MPR; le premier pour l'acheminement du trafic de broadcastings noté FMPRi qui 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 et sont choisis à travers l'heuristique du simple greedy; le deuxième ensemble nommé QMPRi est sélectionné, afin d'améliorer la qualité de service, en utilisant une heuristique à une seule métrique comme GE_3 paramétrée sur la métrique voulue. Mais le problème de cette méthode est que l'utilisation de ces deux ensembles MPR peut dégrader l'efficacité du réseau en consommant la bande passante, l'énergie et même le temps. De plus, cette utilisation conjointe surcharge le réseau sachant que; la fréquence de calcul de l'ensemble MPR est considérable (presque toutes les deux secondes, selon la RFC 3626); et aussi, l'opération de calcul de l'ensemble MPR dépend de la taille du voisinage à un saut et à deux sauts. Tout cela sera augmenté par le calcul d'un autre ensemble qui est le QMPR, ces nœuds doivent à leur tour, communiquer à tout le voisinage via les messages TC, les informations de QoS sur les liaisons qui leur rattachent aux nœuds qui les ont choisis. Chose qui peut augmenter considérablement le trafic *overhead*. Ces deux remarques ont été prises en considération lors de la conception de notre nouvelle approche en essayant de conserver les fonctionnalités d'OLSR, en implémentant un seul ensemble MPR et en se basant sur un algorithme permettant d'optimiser le temps de calcul des MPRs, tout en assurant la qualité de service.

4.5.2 Calcul des routes à qualité de service

Le calcul des routes à qualité de service est un problème qui a été étudié dans les réseaux filaires (Martins 1984), une adaptation de ces algorithmes a été l'objet des études de (Costa *et al.* 2002; Badis & Al Agha 2005). Les deux ont proposé une série d'algorithmes où deux classes peuvent être distinguées : la première est basée sur une seule métrique tandis que la deuxième est basée sur plusieurs métriques. Les concepteurs de ces algorithmes essaient toujours de garder une complexité réduite pour qu'elle soit applicable aux réseaux adhoc. Il paraît essentiel de noter que les algorithmes proposés pour le calcul des routes à QoS, lorsqu'ils sont appliqués sur un protocole proactif comme OLSR, ils utilisent la vue construite par la connaissance du voisinage à un et à deux sauts plus les liaisons communiquées par les MPRs non sélectionnés au préalable. En se basant sur des métriques de qualité de service, les routes sont calculées sur un graphe qui ne contient pas forcément les meilleurs liens en termes de qualité de service et risque de ne pas avoir des bons résultats.

4.6 NOTION DE DURÉE DE VIE DE RÉSEAU

la Notion de vie est l'un des critères les plus considérés lors de l'évaluation de la performance d'un réseau adhoc ou d'un réseau de capteurs AWSN. Plusieurs travaux de recherche ont pris comme objectif l'amélioration de ce critère qui représente un paramètre essentiel de la QoS dans les

MANET et quatre principales définitions ont été donnés afin d'expliquer convenablement cette notion, à savoir ; celle basée sur le nombre de nœuds vivants, les exigences de la qualité de service, la couverture du réseau et la connectivité.

4.6.1 Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants

Dans ce cas, la durée de vie du réseau est définie par le temps écoulé jusqu'au moment où un certain nombre de nœuds épuise leur batterie. Il existe plusieurs définitions possibles dans cette catégorie selon le nombre de nœuds défaillants à considérer. Dans (Holland & Vaidya 1999; Tsaoussidis *et al.* 2000; Tsaoussidis *et al.* 1999; Singh & Singh 2002) la durée de vie d'un réseau est définie par la durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie. Certains auteurs excluent les stations de base dans le calcul de la durée de vie du réseau puisque celles-ci sont généralement alimentées par le courant continu (Singh & Singh 2002). Ces définitions sont dites, durée de vie N-de-N (n-of-n lifetime). La durée de vie t_n^n est définie par l'équation suivante :

$$T_n^n = \min_{v \in V} T_v \quad (4.4)$$

T_v est la durée de vie du nœud v et n est le nombre de nœuds. Dans un modèle de réseau hiérarchique, la durée de vie est définie par la durée jusqu'à ce que le premier *clusterhead* épuise sa batterie (Clausen *et al.* 2003). Une autre variante de la définition de la durée de vie d'un réseau peut aussi s'exprimer en fonction du nombre de noeuds vivants. Dans (Mahfoudh & Minet 2007; Cizeron 2009), la durée de vie est calculée par la période de temps écoulée jusqu'à ce qu'il reste au plus une fraction β de noeuds vivants dans le réseau. Cette définition est dite durée de vie K-de-N (k-of-n lifetime). Une autre définition consiste à considérer la durée jusqu'au moment où 50% des noeuds épuisent leur énergie (Yu *et al.* 2001). Dans (Ngom 2016), la durée de vie d'un réseau est exprimée par la durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie. Bien que cette catégorie de définition soit la plus simple, certaines définitions de la durée de vie peuvent s'avérer imprécises. Prenons l'exemple de la définition durée de vie K-de-N et nous considérons le cas de $k' < k$ nœuds qui sont à des positions stratégiques (autour de la station de base par exemple) et qui épuisent leurs énergies. Le reste des noeuds ne peuvent désormais transférer leurs messages au Sink. Ainsi, le réseau est considéré comme non fonctionnel. Pourtant la définition de la durée de vie ne reconnaît pas cette situation et attend jusqu'il y ait exactement k noeuds défaillants pour considérer le réseau comme non fonctionnel.

4.6.2 Durée de vie basée sur la couverture

Compte tenu des caractéristiques spécifiques des réseaux de capteurs, mesurer la durée de vie du réseau par la période durant laquelle le réseau peut couvrir la zone d'intérêt semble être un moyen naturel. La couverture peut être définie de différentes façons, en fonction de la composition de la région d'intérêt et de la redondance atteinte de la couverture. Il existe deux approches pour décrire le degré de couverture d'un réseau

de capteurs donné. La première approche exige que seulement une portion α de la région d'intérêt soit couverte par au moins un capteur. Ceci est communément appelé α - *couverture*. La seconde approche vise à atteindre plus de redondance et nécessite donc que chaque point à l'intérieur de la région d'intérêt soit recouvert par au moins k capteurs. C'est ce qu'on appelle k -couverture. Ainsi, nous distinguons plusieurs définitions de la durée de vie d'un réseau en fonction de la définition adoptée de la couverture. Parmi celles-ci nous citons la définition la plus courante 1-couverture qui définit la durée de vie comme la période pendant laquelle la région d'intérêt est totalement couverte par au moins un noeud capteur (Camp *et al.* 2002; Sarkar *et al.* 2008). Une autre variante de cette définition est que seule une fraction α de la région d'intérêt doit être couverte. Cette définition est adoptée dans (Belkheir 2015). Une variante plus stricte exige que chaque point de la zone d'intérêt doive être couvert par au moins k noeuds. Cette définition est adoptée par exemple dans (Ros 2006). Par ailleurs, notons que la couverture du noeud est souvent considérée comme la mesure la plus importante pour définir la qualité de service d'un réseau. Ce paramètre est primordial notamment pour les travaux s'intéressant à la problématique de déploiement des réseaux et des algorithmes d'ordonancement. Néanmoins, ce paramètre n'est pas suffisant pour la définition de la durée de vie puisqu'il n'est jamais garanti que les données mesurées soient transmises au noeud collecteur (Akyildiz *et al.* 2002).

4.6.3 Durée de vie basée sur la connectivité

La connectivité est une mesure qui est couramment rencontrée dans le contexte des réseaux ad hoc parce qu'il n'y a pas de notion de couverture du noeud dans ce type de réseaux et par conséquent la capacité de transmettre des données vers une destination donnée est plus importante. (Karl & Willig 2007) définit la connectivité dans un réseau ad hoc par la durée minimale durant laquelle le pourcentage des noeuds vivants ou la taille de la plus grande composante connexe du réseau devient inférieure à un seuil donné. Cette définition est insuffisante pour les réseaux de capteurs puisque la connectivité vers la station de base est ce qui importe le plus. Dans (Soro & Heinzelman 2005), la connectivité dans un réseau de capteurs est définie par le pourcentage de noeuds qui ont des chemins vers la station de base. Ainsi, la durée de vie du réseau est la durée pendant laquelle un pourcentage donné de noeuds possèdent un chemin vers la station de base. Plusieurs travaux ont associé la métrique de couverture à celle de connectivité. Par exemple, (Hellman & Colagrosso 2006) définit la durée de vie du réseau par la période jusqu'à ce que la couverture ou la connectivité du réseau devienne inférieure à un seuil prédéfini. Dans ce cas, la couverture est mesurée en termes de α - *couverture*. La connectivité est mesurée en termes de taux de messages délivrés au Sink. Une autre définition est proposée dans (Ros 2006) et qui consiste à définir la durée de vie du réseau par l'espérance de l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une k -couverture est au moins égale à β .

4.6.4 Durée de vie basée sur les exigences de la qualité de service

Certains travaux définissent la durée de vie du réseau en termes de paramètre de qualité de service requise pour l'application. Dans (Tian & Georganas 2002), la durée de vie est définie par la période pendant laquelle le réseau satisfait la qualité de service requise. (Karl & Willig 2007) définit la durée de vie du réseau comme étant la période jusqu'à ce que le réseau n'est plus capable de fournir un taux acceptable de détection d'événements. Cette définition est vague, puisqu'on ne spécifie pas le paramètre de qualité de service à considérer, et non précise (Clausen *et al.* 2003). Sachant que ces nœuds sont alimentés par batteries difficilement remplaçables et dont leur durée de vie est directement liée à l'activité du nœud dans le réseau. Ceci a un effet direct sur la diminution de la durée de vie de ces nœuds qui, à leur tour, impactent la durée de vie de tout le réseau adhoc mobile ou de capteurs sans fil. Pour cela, ce présent travail a opté pour la durée de vie du réseau comme paramètre à améliorer afin de préserver le maximum de nœuds en vie dans le but d'éviter des trous dans le réseau, causés principalement par les nœuds morts et qui influence gravement sur les autres critères de la QoS.

4.7 PROTOCOLE WRE-OLSR

Cette partie décrit en détail le premier apport au protocole OLSR, réalisé lors de ce présent travail de recherche, en implémentant l'énergie résiduelle des nœuds comme facteur de sélection des MPRs dans le réseau Adhoc et AHWSN. Comme il a été déjà stipulé, les champs réservés dans les paquets de contrôle du protocole OLSR basique ont été utilisés afin de transmettre l'information relative à l'énergie des nœuds. Ensuite, l'heuristique de calcul des MPRs dans chaque nœud a été modifiée, ceci a été fait afin de tenir en compte de l'énergie des nœuds dans le processus de choix des MPR. Enfin, les différents travaux de simulations réalisées ont été comparés avec OLSR basique pour montrer l'influence de cette nouvelle version sur le paramètre de la durée de vie et le taux des paquets perdus dans le réseau (Belkhira *et al.* 2019). Dans ce qui suit, nous détaillons notre approche baptisée WRE-OLSR (*Weighting Reachability Energy-OLSR*).

4.7.1 Messages de contrôle et algorithme d'inondation dans WRE-OLSR

Dans le but de ne pas générer un flux *overhead* supplémentaire, le protocole WRE-OLSR utilise les mêmes mécanismes d'inondation que le protocole classique OLSR (RFC 3626). Les modifications effectuées dans ce nouveau protocole, ont touché essentiellement le format et le contenu des messages HELLO et TC. Ces derniers ont été modifiés pour transmettre l'information de l'énergie résiduelle de chaque nœud dans le réseau.

4.7.2 Nouveau message HELLO dans WRE-OLSR

Dans le nouveau protocole WRE-OLSR (Fig.4.2), chaque nœud doit diffuser dans son message HELLO (Fig.4.1) l'état de son énergie, pour qu'elle soit prise en compte dans l'algorithme de la sélection des MPRs pour permettre à chaque nœud de savoir l'état d'énergie de ses voisins.

Reserved		Htime	Willingness
Link code	Reserved	Link Message Size	
Neighbors interface address			
Neighbors interface address			

FIGURE 4.1 – Message HELLO dans OLSR

Reserved	Energie	Htime	Willingness
Link code	Reserved	Link Message Size	
Neighbors interface address			
Neighbors interface address			

FIGURE 4.2 – Message HELLO dans WRE-OLSR

4.7.2.1 Nouveau message TC dans WRE-OLSR

Contrairement aux messages HELLO qui sont diffusés seulement dans les nœuds MPRs, les messages TC sont diffusés dans le réseau entier en utilisant le processus d'inondation optimisée d'OLSR par l'intermédiaire des MPRs. À cet effet, l'état de l'énergie résiduelle a été, aussi, inséré dans les messages TC (Fig.4.3 Fig.4.4).

ANSN	Reserved
Advertised Neighbors Main Adress	
Advertised Neighbors Main Adress	

FIGURE 4.3 – Message TC dans OLSR

ANSN	Energie	Reserved
Advertised Neighbors Main Adress		
Advertised Neighbors Main Adress		

FIGURE 4.4 – Message TC dans WRE-OLSR

Il est à noter que le champ énergie introduit par le nouveau protocole (WRE-OLSR) dans le message TC peut prendre les mêmes valeurs que dans les messages HELLO.

4.7.3 Sélection des MPRs dans le protocole WRE-OLSR

Une nouvelle heuristique de sélection des MPR a été proposée dans le protocole WRE-OLSR. Elle est basée sur l'heuristique décrite dans le RFC 3626, avec comme objectif d'avoir un compromis de choix entre les nœuds possédant une énergie résiduelle et une reachability optimale. Comme il a été mentionné auparavant, les champs reserved des paquets HELLO et TC sont exploités afin d'acheminer l'information de l'énergie résiduelle de chaque nœud qui sera interchangée périodiquement et stockée dans la table de voisinage, qui englobe tous les nœuds à un saut. Ces derniers seront les candidats dans la compétition pour être des MPR. L'information acheminée par les paquets TC sera stockée dans les tables de routage pour une éventuelle utilisation. Selon l'algorithme de sélection des MPR RFC 3626, décrit précédemment le choix des MPR est basé sur deux parties (Clausen *et al.* 2003); la première partie consiste à relier les nœuds isolés, qui sont des nœuds du voisinage à deux sauts et qui sont couverts par un seul nœud du voisinage à un saut. Cette étape ne pourra pas être modifiée et c'est le cas de tous les travaux de recherche qui ont touché à cet algorithme (Busson *et al.* 2005) Fig4.5. Donc toutes les modifications seront apportées sur la deuxième étape de l'algorithme qui consiste à relier le reste des nœuds à deux sauts à travers les MPR optimaux. Le paramètre *Willingness* qui représente la capacité exprimée par le nœud pour être un MPR, sera configuré à *Will-défaut* pour permettre aux nœuds de choisir leur MPR sans influence directe de ce paramètre. Le problème de choix des MPR est équivalent au problème connu dans le domaine de la théorie des graphes qui est le choix de l'ensemble dominant et qui est classé comme problème NP-complet (Qayyum *et al.* 2000). La résolution de ce genre de problème nécessite le recours à des méthodes approchées comme les heuristiques afin d'avoir un résultat satisfaisant dans un temps raisonnable sachant que les nœuds ont généralement une faible capacité de calcul. Plusieurs heuristiques ont été proposées dans la littérature pour la résolution de ce problème d'optimisation (Mans *et al.* 2004; Qayyum *et al.* 2002). Cette présente recherche, a fait l'objet d'une amélioration de l'OLSR stan-

dardisé dans le RFC 3626, notamment sur l'heuristique de choix des MPRs illustré par l'organigramme 4.5 :

Step 1 : covering all isolated nodes in the 2-hop neighborhood.

Step 2 : MPR selection based on the node position (reachability)

The MPR(x) is filled by node satisfying conditions described by the three steps below, until we cover all the 2-hop neighboring of node x :

1. Order every node y in $N_1(x) / MPR(x)$, where y should cover the higher number of nodes belonging to $N_2(x)$. Insert y in MPR(x).
2. If we face equalities in the results, we select node y with the higher willingness.
3. If we face another equalities, we compute $R = \max_{z \in N_1(y)} D_y^+(z)$. Then we select as MPR the node y with higher $D(y)$

The reachability R of a node y in $N_1(x) / MPR(x)$ is calculated as follow :

$$R = \max_{z \in N_1(y)} D_y^+(z) \quad (4.5)$$

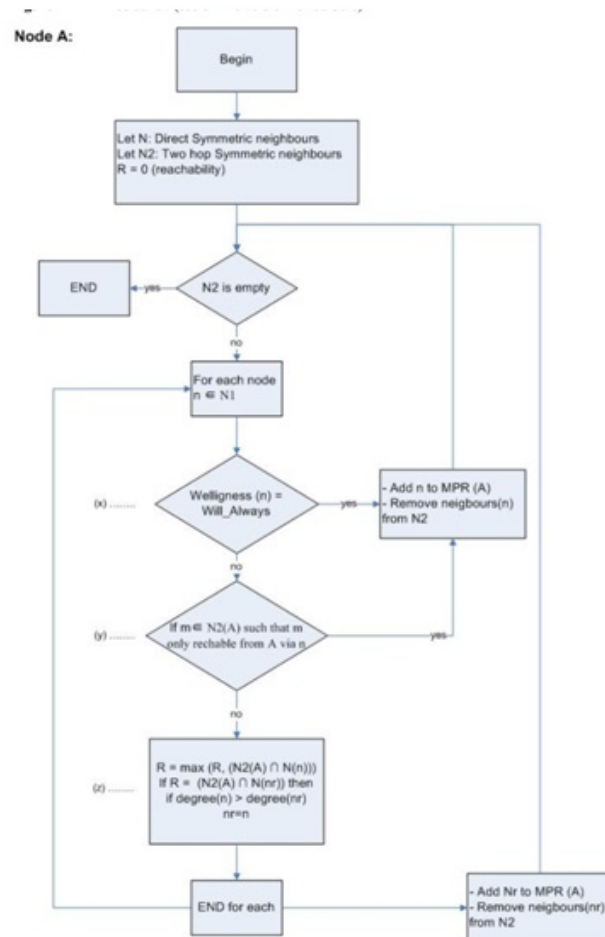


FIGURE 4.5 – sélection des MPR (Saddiki et al. 2017)

Pour commencer, il faut savoir que l'ensemble MPR pour un nœud x n'est pas unique, ce qui donne la possibilité de chercher un autre ensemble plus performant selon un autre point d'intérêt ou d'autres critères. Comme illustré par l'algorithme (Fig.4.5), le choix des MPR est restreint uniquement sur la positions des noeuds (le paramètre *reachability*), ce qui engendre le choix permanent des nœuds bien positionnés et qui permet de joindre le max des nœuds à deux sauts, puisque les MPR sont responsables du cheminement des paquets TC et data au nœud suivant, ce qui cause l'épuisement rapide de leur batterie. Ce phénomène cause des trous dans le réseau et peut isoler des parties influençant non seulement la durée de vie du réseau, mais la capacité de garantir les différents critères de la QoS , à savoir le délai de bout en bout et le nombre de paquets perdus. Notre nouvelle approche consiste à introduire le critère énergie dans le choix des MPR en introduisant une formule mathématique qui permet d'avoir une nouvelle quantité en fusionnant les deux paramètres énergie et reachability. Pour bien illustrer l'impact de la tâche MPR sur l'énergie d'un nœud, une simulation a été lancée pour permettre de comparer la consommation de l'énergie entre deux nœuds. Le premier est forcé à être toujours un MPR à travers son *Willingness* paramétrée à *Will-always* et le deuxième est forcé à ne pas être choisi comme MPR en mettant son *Willingness* à l'état *Will-never*. Fig.4.6 illustre l'impact de cette situation sur deux nœuds ayant initialement la même énergie.

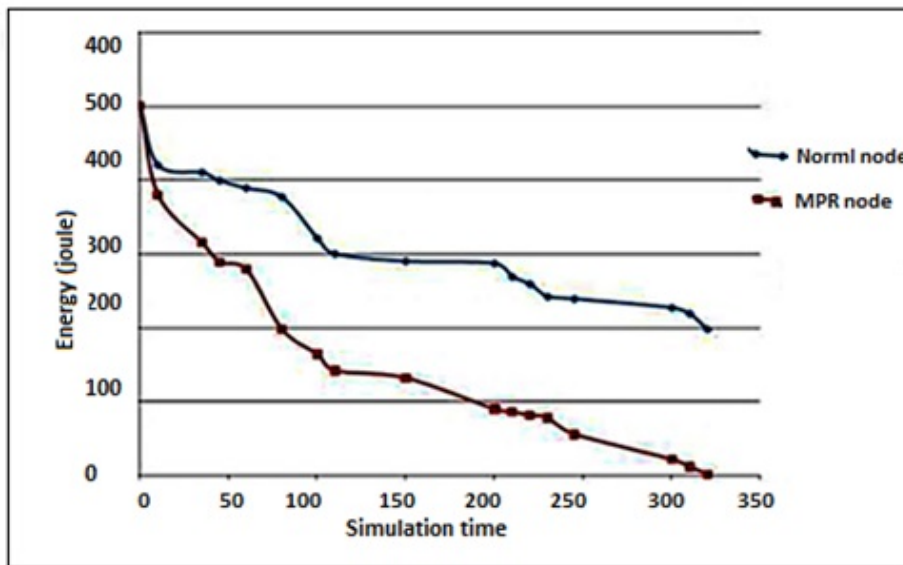


FIGURE 4.6 – comparaison de la consommation d'énergie entre un nœud MPR et un nœud Non-MPR. (Lakrami & Elkamoun 2012)

Le graphe montre bien qu'à la seconde 325 est lorsque le nœud MPR est mort le nœud Non-MPR détient encore 40 % de son énergie. Cette différence est due, en fait, à la tâche supplémentaire, gourmande en énergie, affectée au nœud MPR pour acheminer (retransmission) les paquets TC et data. Donc pour permettre une meilleure performance, il faut trouver un mécanisme qui permet d'équilibrer cette tâche entre les différents nœuds du voisinage à un saut afin de préserver le maximum de nœuds en vie, ce

qui influence directement la durée de vie du réseau et d'une manière indirecte sur les autres paramètres de la QoS, en préservant le max de routes disponibles et une meilleure couverture des nœuds du réseau. dans ce qui suit, on commence d'abord par démontrer, que l'ensemble MPR n'est pas unique, et qu'il existe d'autres ensembles MPR a choisir en utilisant d'autres critères hors que la *reachability*(Barki *et al.* 2020) .

4.7.4 Démonstration

Le but de cette démonstration est de prouver que l'ensemble MPRs n'est pas unique, ce qui nous donne la possibilité de choisir un autre ensemble selon d'autres critères a l'instar de ; l'énergie, la bande passante disponible, la capacité de calcul. Toutefois, la seule contrainte est que les nœuds à deux sauts ne sont pas totalement couverts lors de la première étape de l'algorithme 4.5 (dédiée a couvrir les nœuds isolés). Dans ce cas, il existe forcément un seul ensemble MPR qui peut couvrir tout le voisinage, il est déjà souligné que les changements possibles sur l'heuristique de choix des MPRs sont seulement au niveau de la deuxième étape reference :

$$Si \exists y \in N(x), Alors \exists MPR(x) / y \in MPR(x)$$

Donc s'il existe un élément y du voisinage direct il existe un ensemble MPR qui peut contenir cet élément

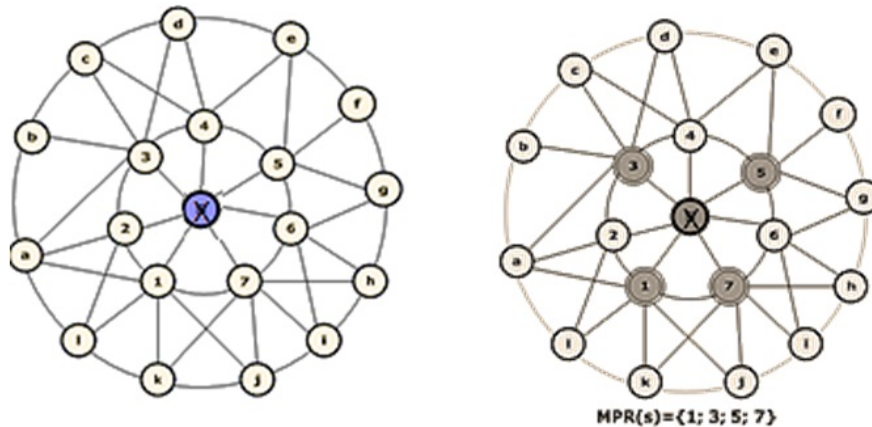


FIGURE 4.7 – Exemple de détermination du MPR set

On peut remarquer à travers l'exemple que le nœud x a choisi parmi son voisinage les nœuds (1, 3, 5, 7) pour être MPR, puisqu'il existe parmi son voisinage à deux sauts des nœuds non isolés. Ça veut dire que l'ensemble MPR n'est pas unique et qu'il existe d'autres ensembles MPR totalement ou partiellement différents, dans l'exemple de Fig.4.7 on peut trouver un autre ensemble MPR (4; 6; 2).

4.7.5 Nouvelle approche pour le calcul de l'ensemble MPR

Notre nouvelle approche est basée sur l'intégration du paramètre énergie combiné avec le paramètre de *reachability* afin d'avoir la nouvelle métrique, ci après : $MPR(x)$ est un ensemble de nœud appartient à $N(x)$ qui sont choisis par le nœud x comme MPR :

- On suppose que $y \in N(x)$ and $y \notin MPR(x)$
- On définit E_n :le pourcentage de l'énergie résiduelle du nœud n donc $E_n \in [0,1]$
- On va définir une nouvelle formule de calcul de reachability qui sera notée R' et sera calculée par une pondération entre la reachability d'un nœud R_n et son énergie résiduelle E_n .
- La nouvelle équation sera comme suit :

$$R'(y) = (w * E_n) + (1 - w) \frac{D_x^+(x)}{|N_2(x)|} \quad (4.6)$$

le paramètre $|N_2(x)|$ est le cardinal de $N_2(x)$. on a introduit ce paramètre pour normaliser la formule et pour rendre la nouvelle quantité $\frac{D_x^+(x)}{|N_2(x)|} \in [0,1]$ dans le même intervalle que E_n . pour permettre la pondération on va introduire un nouveau paramètre W qui représente le poids de l'énergie dans le calcul de la nouvelle **reachability** R' . Si on trouve deux nœuds $z \in MPR(x)$ et $y \notin MPR(x)$ qui satisfont la relation 4.5 :

$$E_n(y) - E_n(z) > \frac{1 - w}{w} * \frac{R(z) - R(y)}{|N_2(x)|} \quad (4.7)$$

Le nœud y va être choisi comme MPR à la place du nœud z . La seconde étape de l'heuristique de l'OLSR sera modifiée comme suite :

Algorithme 6 :

```

while  $N_2(x) \neq \emptyset$  do
  For Each node  $y \in N(x)$ 
    if  $R'(y) = \max_{z \in N(x)} R'(z)$  then
      Select  $y$  as  $MPR(x)$ 
      /* Select as MPR(x) the node y which cover the maximal
         number of nodes in  $N_2(x)$ */
      Remove  $y$  from  $N(x)$  and remove  $N_1(y) \cap N_2(x)$  from
          $N_2(x)$ 

```

$$\text{Where } D_x^+(x) = |N_1(y) \cap N_2(x)| \quad (4.8)$$

Cette nouvelle méthode permettra :

- Aux nœuds qui n'ont pas la chance d'être sélectionnés comme MPR de l'être si leur état énergétique par rapport aux autres nœuds MPR le permet à un moment donné,
- Un équilibrage de charge peut être réaliser, à travers l'alternance entre les nœuds du voisinage à un saut lors du choix des MPR,
- Préserver la majorité des nœuds le plus longtemps possible, et comme résultat l'augmentation de la durée de vie du réseau,
- Conserver le plus grand nombre de routes le plus longtemps possible,
- Améliorer d'autres paramètres tels que le délai de bout en bout et le taux de paquet perdu.

On peut expliquer cette méthode à travers l'exemple illustrer par la figure 4.11

On définit par exemple les états énergétiques du voisinage de X comme suit :

$E_n (X)$ est l'énergie résiduelle du noeud x.

suposant le scenario avec les états energetiques suivantes :

En(1)=30%;En(2)=80%; En(3)=35%; En(4)=75%; En(5)=25%;En(6)=90%;
En(7)=20%.

Si on prend le paramètre $w = 0.5$ ça veut dire que la nouvelle reachability R' est calculé comme suit :

$$R' (y) = 0,5 * E_n + 0,5 * \frac{R'}{|N_2(x)|}$$

Les nœuds 5 et 3 couvrent des nœuds isolés dans $N_2 (x)$ (i.e. les noeuds g et b). Donc ils ne peuvent pas être remplacés. Ils seront insérés dans l'ensemble $MPR(x)$ dans l'étape 1 de l'heuristique. Par contre, pour les autres nœuds comme 6 et 7 on va calculer la nouvelle reachability :

$$R' (6) = 0,5 * 0,9 + 0,5 * \frac{3}{10} = 0,6$$

$$R' (7) = 0,5 * 0,2 + 0,5 * \frac{4}{10} = 0,3$$

Avec $|N_2 (x)| = 10$ On peut remarquer que le nœud 6 avec cette nouvelle méthode remplace le nœud 7, permet ainsi de crée un nouvel ensemble MPR $MPRset$ qui est $MPR(x)=1,3,5,6$. La relation 4.7 peut être généralisé pour n'importe qu'elle nœud de $N(x)$, comme suit :
pour n_i et n_j deux noeuds de $N(x)$:

$$\begin{aligned} \text{Si } E_i (y) - E_j (z) &> \frac{1-w}{w} * \frac{R(i)-R(j)}{|N_2(x)|} \\ \text{Alors inclure } n_i &\text{ dans } MPR(X) \\ \text{Sinon inclure } n_j &\text{ dans } MPR(X) \end{aligned}$$

Pour donner une meilleure efficacité de la nouvelle méthode, il demeure essentiel de bien choisir la valeur du paramètre w . Pour cela, nous procédrons à faire une étude théorique et expérimentale afin de choisir la meilleur valeur qui permet d'améliorer les paramètres de la QoS visés, à savoir la durée de vie des réseaux et les délais de bout en bout ainsi que le taux de paquets perdus.

4.7.6 Choix du paramètre de pondération entre l'énergie résiduelle et la reachability w

La relation de pondération entre l'énergie résiduelle d'un nœud et sa reachability dépend de la fonction mathématique décrite ci-dessous :

$$f (w) = \frac{w}{1 - w} \quad (4.9)$$

Fig 4.8 illustre le graphe de la fonction $f(w)$ en fonction de w avec $w \in [0, 1]$; le domaine de définition de $f(w)$ s'étale sur l'intervalle $[0, +\infty]$

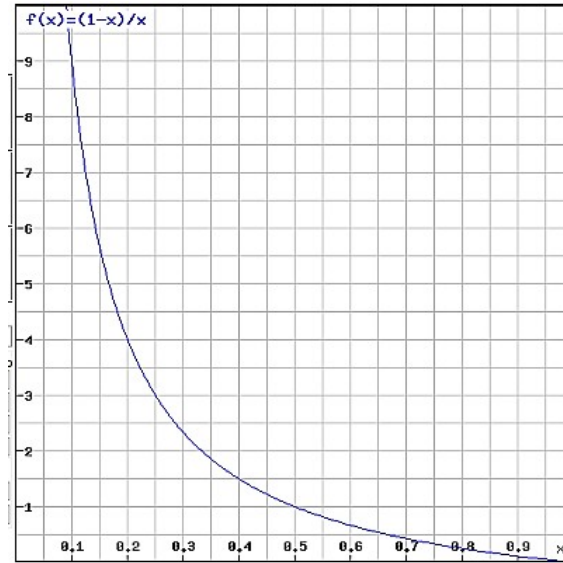


FIGURE 4.8 – Variation de $f(w)$ en fonction de w avec $w \in [0,1]$

Donc, on peut calculer les valeurs de fonction $f(w)$ en changeant les valeurs de w suivant les binômes $(w, f(w))$

$$(0.1,9),(0.2,4),(0.3,2.33),(0.4,1.5),(0.5,1),(0.6,0.66), \\ (0.7,0.42),(0.8,0.25),(0.9,0.11)$$

Cela veut dire que le choix du poids w qui permet la pondération entre le niveau d'énergie de la batterie du nœud et sa reachability est très crucial. Pour permettre un bon choix, nous avons effectué plusieurs simulations en fonction de plusieurs paramètres tels que la densité des réseaux et la vitesse des nœuds afin de choisir le meilleur compromis nous permettant de donner les meilleurs résultats de la QoS. Les simulations ont été réalisées en utilisant NS-2 comme plateforme de simulation et les résultats seront discutés dans la section suivante.

4.7.7 Sélection du paramètre W

Comme il été précédemment décrit, le choix du paramètre W est très important, donc il est très essentiel d'analyser l'influence de ce paramètre sur les différents paramètres de la QoS. Ceci afin de déterminer la meilleure pondération entre l'énergie et la reachability qui permet d'avoir le meilleur résultat.

- $W=0$ veut dire que la nouvelle reachability dépend seulement de la position du nœud qui détermine le nombre de connexions qui peut assurer avec les nœuds à deux sauts, ça veut dire que nous sommes dans le cas de l'OLSR basique.
- $W=1$ veut dire que seule l'énergie des nœuds du voisinage à un saut est prise en compte lors du choix des MPR et qui couvre le voisinage à deux sauts.

Les autres valeurs dans cet intervalle définissent la pondération entre l'énergie du nœud et sa reachability utilisée afin de choisir les MPR. Les deux graphes suivants (Fig.4.9, Fig.4.10) récapitulent les résultats de nos

simulations relatives aux choix du paramètre w , en fonction de la densité du réseau (nombre de noeuds dans le réseau).

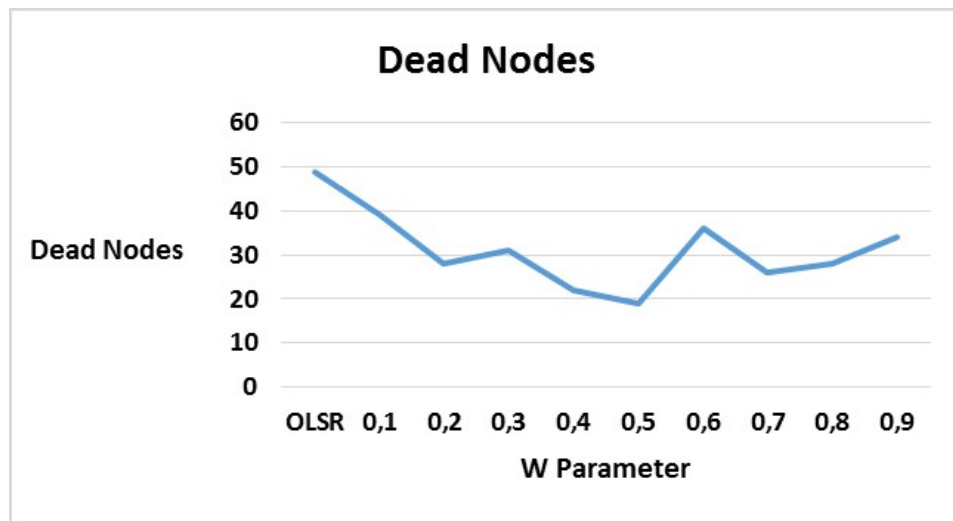


FIGURE 4.9 – Nombre des noeuds épuisé en fonction du paramètre w

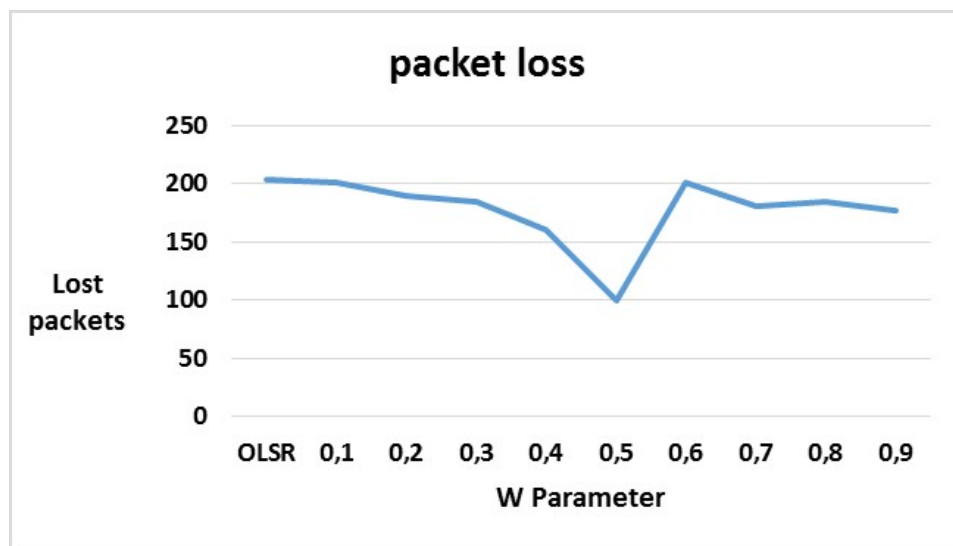


FIGURE 4.10 – L'impact de w sur les paramètres de la QoS

Un nœud mort dans le réseau qui a épuisé la totalité de son énergie, ne peut pas échanger des paquets avec son environnement, ce qui le rend inutile. De ce fait le nombre de nœuds morts est un paramètre très essentiel donnant une très bonne idée sur l'état du réseau. Le paramètre nombre de paquets perdus détermine le nombre de paquets perdus durant le temps d'activité du réseau. Ce paramètre mesure l'efficacité du réseau à acheminer les paquets de données de la source à la destination.

Les deux graphes montrent l'effet de la variation du paramètre W sur les deux paramètres de la QoS ciblés. Les résultats montrent clairement que le meilleur intervalle de W est $[0,4, 0,6]$. Suite à ce résultat dans le reste des simulations la valeur de W sera fixé à $W=0,5$. Cette valeur indique que le poids est équitable entre l'énergie du nœud et sa reachability.

Après avoir choisi la valeur de W qui permet d'optimiser les paramètres de la qualité de service, à savoir le nombre de nœuds morts et le nombre de paquets perdus, il demeure intéressant de comparer la nouvelle approche avec L'OLSR basique afin d'étudier l'influence de cette nouvelle méthode sur les différents paramètres de qualité de service et dans différentes conditions de simulation.

4.7.8 Métriques d'évaluation

Afin d'évaluer le nouveau protocole WRE-OLSR, quatre paramètres ont été exploités, à savoir ; le délai de transmission de bout en bout ; le pourcentage de paquets délivrés ou le nombre de paquets perdus qui mesure la même métrique de QoS ; le nombre des nœuds morts (dead nodes) et le overhead qui représente le nombre de paquets de signalisation.

En commençant par le délai de bout-en-bout (délai de latence ou temps de réponse), est par définition le temps écoulé entre l'émission et la réception d'un paquet. Pour ce paramètre trois types de délais à travers le réseau ont été distingués :

- Le délai de propagation (D_p) ayant une valeur fixe car il ne dépend que du support de transmission, ce premier délai désigne le temps effectué par la transmission d'un bit via le média de transmission ;
- Le délai de traitement (D_t) qui correspond au temps utilisé par un routeur pour le traitement d'un paquet, c'est-à-dire le temps effectué pour traiter un paquet de l'interface d'entrée et le mettre dans la file d'attente de l'interface de sortie, ce dernier varie en fonction de la vitesse du CPU, de son utilisation, du mode de commutation utilisé, mais aussi de l'architecture du routeur et de la taille du paquet ;
- Le délai de mise en file d'attente (D_f), ce troisième, désigne le temps nécessaire pour que le paquet passe dans la file d'attente de la sortie du routeur, quant à lui, il dépend du nombre et de la taille des paquets déjà dans la file, de la bande passante de l'interface et du mécanisme de gestion de la file d'attente.

La somme de ces trois délais observés à travers le chemin de la source à la destination correspond au délai de bout en bout donné par la formule suivante : Délai de bout en bout = $D_p + D_t + D_f$ (Belkheir 2015)

Ensuite, le deuxième paramètre, dénommé le pourcentage des paquets délivrés PDR de l'anglais Packet Delivery Ratio, est une métrique qui permet de calculer le nombre total des paquets délivrés à une destination par rapport au nombre des paquets transmis. En effet ce paramètre mesure l'efficacité du protocole réseau implémenté pour router l'information de la source à la destination d'une manière fiable.

On peut analyser cette métrique aussi par le paramètre de nombre de paquets perdus (packet-loss) qui est une métrique importante aidant à déterminer la performance du protocole dans la transmission des paquets de données de la source vers la destination. Il est défini par la formule suivante : Packet-loss = N de paquets émis – N de packets reçus.

L'amélioration de ce paramètre évite les retransmissions qui sont dues aux pertes de paquets dans le réseau. Ces retransmissions épuisent considérablement l'énergie des nœuds et diminuent la durée de vie du réseau. Une

valeur moindre du packet-loss signifie une bonne performance du protocole de routage implémenté.

Le troisième paramètre, le nombre des nœuds morts, est défini par le nombre des nœuds qui se déchargent après le temps de simulation. Un nombre faible des nœuds morts signifie l'augmentation de la durée de vie des réseaux.

Enfin, le contrôle overhead représente le nombre de paquets de signalements ou les paquets data, ce paramètre montre l'efficacité du protocole à exploiter la bande passante un nombre faible des overhead signifie que le protocole assure cette qualité de service et préserve la bande passante pour le trafic data.

4.7.9 Paramètres de simulation

Plusieurs paramètres de simulations agencés en trois groupes ont été exploités ; le premier groupe rassemble les paramètres de connexion (type de canal, type d'interface réseau, type de file d'attente, modèle de mobilité, intervalle des messages HELLO, etc.); le deuxième réunit ceux de la topologie (nombre de connexions, débit, énergie initiale ,protocole de routage). Les paramètres de ces deux premiers groupes ont été fixés lors de ce présent travail. Le troisième groupe, quant à lui, collectionne les paramètres de trafic à l'instar de la surface, le nombre de nœuds, la vitesse des nœuds, qui ont été variés afin de conclure l'effet de ces derniers sur les métriques d'évaluation. Les tableaux ci-dessous présentent le récapitulatif des paramètres de simulations. Ces paramètres sont utilisés dans le script de simulation de ns-2 écrit en TCL.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Type de canal	Sans fil (wireless)
Modèle de propagation radio	Two Ray Ground
Type d'interface réseau	IEEE 802.11
Type de file d'attente	DropTail/ Priority Queue
Longueur de la file d'attente	50 Paquets
Couche liaison	Link Layer (LL)
Type d'antenne	Omnidirectionnal Antenna
Modèle de mobilité	Random WayPoint
Type de Trafic	Constant Bit Rate (CBR)
Trafic	2 Paquets de 512 octets par seconde
Intervalle des messages HELLO	Par défaut (02 Secondes)
Intervalle des messages TC	Par défaut (05 secondes)
Temps de simulation	100 secondes

TABLE 4.2 – table 2

Paramètres	Variation du nombre de nœuds	Variation de la vitesse des nœuds	Variation du nombre de connexions
Surface	870m x 870m	870m x 870m	870m x 870m
Nombre de nœuds	20, 40, 60, 80, 100	40	40
Vitesse des nœuds	3m/s	1, 3, 5, 8, 10 m/s	3m/s
Temps de la simulation	100s	100s	100s

Un réseau ADHOC ou un réseau AHWSN suppose que les nœuds se déplacent en permanence avec des trajectoires aléatoires et des vitesses variables. Le modèle de mobilité retenu « Random Waypoint Model » (Camp *et al.* 2002), semble le plus réaliste afin de simuler un réseau mobile.

4.7.10 Résultats et discussions

Comme il a été déjà évoqué, trois métriques, à savoir ; le délai de bout en bout, le nombre de nœuds morts et le taux de paquets perdus ont été utilisés comme critères d'évaluation de la nouvelle version du protocole OLSR WRE-OLSR proposées dans ce présent travail (Belkhira *et al.* 2019). En effet, ces métriques décrivent les performances en termes de qualité de service du réseau.

L'heuristique de calcul des MPRs, des deux nouvelles versions du protocole OLSR proposées, a été modifiée afin de tenir compte de l'énergie des nœuds dans la décision et le choix des nœuds comme MPR. Ceci par l'intégration du paramètre (w) qui représente la pondération entre l'énergie et la reachability utilisée par l'OLSR dans la norme RFC 3626. Ce nouveau mécanisme permet de sélectionner les nœuds possédant une énergie résiduelle suffisante pour jouer le rôle des MPR et garantir ainsi la transmission des données à travers le réseau afin de permettre une bonne répartition de la charge au niveau du réseau.

Les différents travaux de simulations réalisées dans le cadre des ces présentes nouvelles modifications ont données le résultats décrits dans la section suivante.

4.7.11 Evaluation des paramètres de QoS

4.7.11.1 Nombre de nœuds mort

Dans la présente simulation, un nœud est considéré comme mort si son énergie résiduelle devient inférieure à 5%. Cette métrique demeure très importante afin de savoir si la charge du réseau a été uniformément distribuée sur l'ensemble des nœuds constituant le réseau. À propos de l'essai de l'effet de la densité du réseau sur le nombre de nœuds morts et en augmentant progressivement le nombre de nœuds du réseau (20, 60, 80, 100), la simulation du protocole WRE-OLSR, en le comparant à celui de OLSR basique, illustre une diminution du nombre des nœuds morts, dans le même ordre des densités de (1,19,24,31) pour WRE-OLSR et (8,56,80,91) pour OLSR. Ceci à cause de distribution uniforme de la charge entre les différents nœuds du réseau. Ce résultat déduit une amélioration de la durée de vie du réseau en utilisant le protocole WRE-OLSR (Fig.4.11).

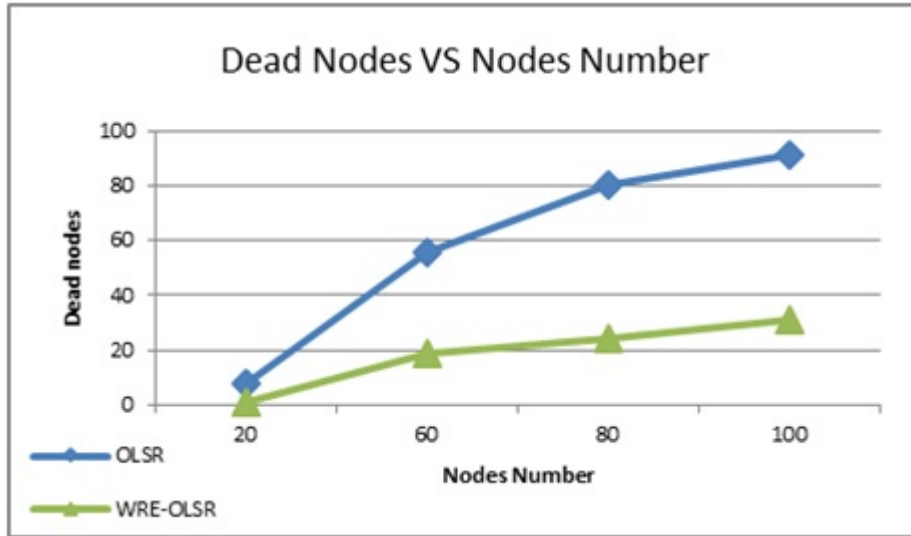


FIGURE 4.11 – l'effet de la densité du reseau sur le nombre de nœuds morts (dead nodes)

En ce qui concerne, l'effet de la mobilité des nœuds du réseau sur la même métrique, celui-ci a affiché une diminution du nombre de nœuds mort de l'ordre de (7,49 ,59 et 50) et de (9,25,9,24) pour les vitesses 3, 5 et 8 m/s, respectivement, sauf pour la vitesse de 1m/S, ceci par comparaison entre les deux protocoles, le référencer OLSR RFC 3626 et le proposé WRE-OLSR. Cette diminution peut être expliquée du faite que la mobilité des nœuds engendre une charge supplémentaire sur la consommation des énergies résiduelles des noeuds et accélère l'épuisement de leurs batteries et par conséquent augmente le nombre de nœuds morts. A cet effet, nous pouvons observer que l'équilibrage appliquée par le protocole proposé WRE-OLSR s'avère nécessaire afin de donner ainsi un apport positif sur la qualité de service du réseau et sa durée de vie (Fig.4.12).

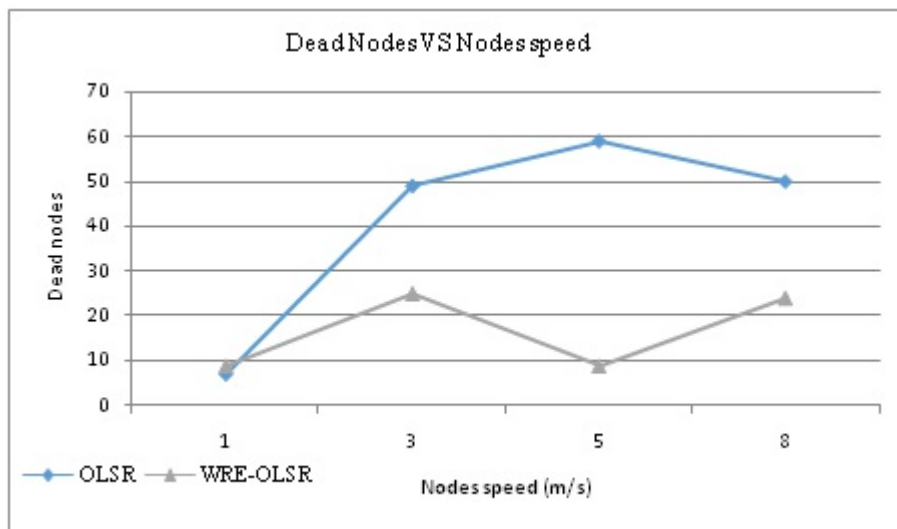


FIGURE 4.12 – l'effet de la mobilité sur le Nombre de nœuds morts (dead nodes)

4.7.11.2 Délai de transmission moyen (*average end-to-end delay*)

Le délai de transmission se réfère au temps écoulé pour transmettre le paquet de données d'un nœud source vers sa destination. Ceci est tributaire de plusieurs paramètres du réseau, entre autres, le nombre de sauts ainsi que le délai de passage dans les files d'attente des routeurs du réseau. l'essai de effet de la variation de la densité sur le délai de transmission a montré une diminution de ce dernier d'environ ($4,88E-05, 1,30E-03, 1,60E-03, 5,20E-03$) pour WRE-OLSR et de ($7,76E-05, 2,34E-03, 7,25E-03, 1,79E-02$) pour OLSR pour les densités (20, 60, 80 et 100) respectivement, ce qui témoigne une amélioration du paramètre du délai du transfert des paquets. Cet impact de la variation de la densité sur cette métrique, est due, premièrement, du fait que les messages sont routés sous la responsabilité exclusive des MPRs et secondant a l'équilibre de charge entre les différents nœuds du réseau pour assurer la tâche MPR. Ceci permet de conserver un nombre suffisant de nœuds pouvant jouer le rôle MPR et ainsi de transmettre efficacement les paquets à travers les chemins les plus optimaux. Cette amélioration de délai de transmission a été manifestée grâce à l'écart du nombre des nœuds vivant entre WRE-OLSR et OLSR basique, puisque la diminution du nombre des nœuds morts observée précédemment a engendré une nette augmentation de choix de route dans le nouveau protocole WRE-OLSR (Fig.4.14).

Pour, le test de la mobilité des nœuds dans le cas des deux protocoles OLSR RFC 3626 et WRE-OLSR avec des différentes vitesses sur le délai de transmission, a montré une diminution de délai de transmission de l'ordre de ($7,11E-04, 1,20E-03, 7,44E-04, 8,48E-04$) pour WRE-OLSR et de ($2,92E-03, 3,15E-03, 1,50E-03, 2,09E-03$) pour OLSR respectivement pour les vitesses de 1, 3, 5 et 8 m/s (Fig.4.13). Ce résultat est en lien direct avec l'augmentation du nombre de nœuds vivants observée lors de la simulation avec le nouveau protocole WRE-OLSR, ce qui donne plus de possibilités lors du routage et permet ainsi aux paquets Data d'empreinter des routes plus optimales, chose qui contribue à l'amélioration du délai d'acheminement de paquets.

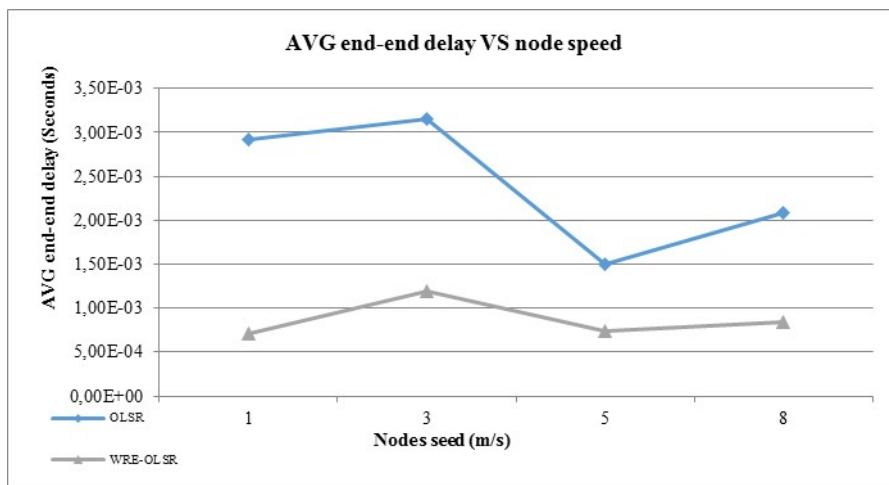


FIGURE 4.13 – Effet de la mobilité du réseau sur le délai de transmission

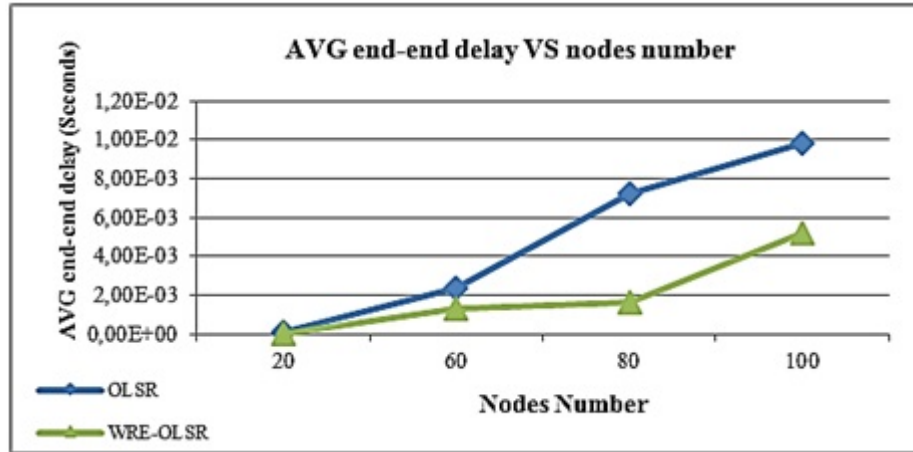


FIGURE 4.14 – Effet de la densité du réseau sur le délai de transmission

4.7.11.3 L'effet de la densité du réseau sur le nombre de messages de contrôle (Control overhead)

Cette métrique consiste à calculer le nombre de paquets de routage à savoir les messages HELLO et TC diffusés périodiquement afin de transmettre un paquet de données entre la source et la destination. Ces messages de contrôle consomment énormément d'énergie, vu leur nombre important et leur périodicité, sachant que la plus grande partie de l'énergie est consommée durant la transmission. Lors de cet essai, l'augmentation de la densité du réseau provoque une augmentation légère des messages de contrôle (overhead) pour le protocole WRE-OLSR, ceci comparativement avec l'OLSR standard RFC3626, de l'ordre de (6600, 29729, 41247, 51101) pour WRE-OLSR et de (5781, 26505, 37519, 47146) pour OLSR, pour les densités testées (20, 60, 80, 100), respectivement. Cette augmentation est normale et elle est expliquée par l'activité résultante de l'augmentation du nombre de nœuds vivants existants dans le réseau et non pas à cause des paquets de signalisation, puisque la modification du protocole OLSR a touché seulement le mécanisme de sélection des MPR. Il est de grande importance à noter que la diffusion de l'information de l'énergie résiduelle a été faite en utilisant les champs reserved des messages Hello et TC (Fig.4.15).

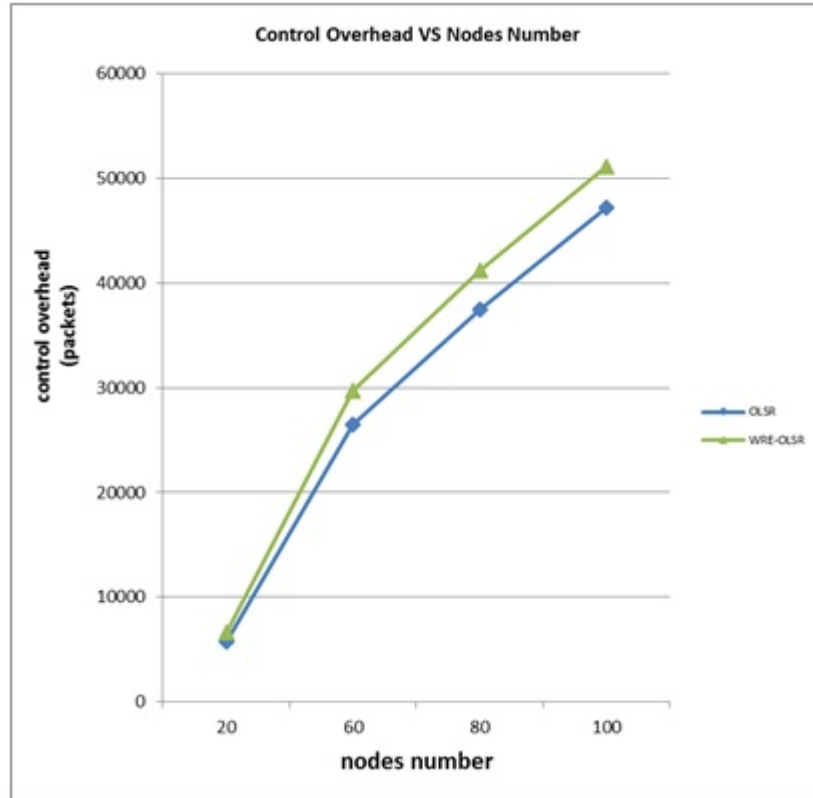


FIGURE 4.15 – effet de la densité du réseau sur les messages de contrôle

4.7.11.4 Nombre de paquets perdus (packet-loss)

L'essai de la simulation de la densité du réseau (20, 60, 80,100) et son impact sur la métrique d'évaluation packet-loss a révélé une diminution du nombre de paquets perdus d'environ 30%, remarquable, à partir de la densité 60. S'agit des deux dernières densités, celles-ci ont donné une diminution de (15,36) pour WRE-OLSR par rapport à (102,86) pour OLSR, à l'exception de la densité 20. Ce résultat a montré que le taux de la retransmission des paquets perdus s'est nettement amélioré et a conduit à une conservation de l'énergie résiduelle des nœuds et par la suite à une augmentation de la durée de la vie du réseau. Ce résultat d'amélioration confirme, toujours, que l'équilibre de charge entre les différents nœuds du réseau permet de garder un nombre plus important de nœuds vivants et augmente la possibilité d'avoir des chemins fiables afin d'assurer l'acheminement de maximum de paquets(Fig.4.16).

Les résultats du test en simulant la mobilité sur le paramètre des paquets perdus (*packet-loss*) a affiché une diminution du nombre de ces derniers d'environ (183, 212, 135, 309) pour WRE-OLSR et de (102, 204, 102, 86) pour l'OLSR par les vitesses (1, 3, 5 et 8 m/s) (Fig.4.17). Comme a été déjà expliqué l'augmentation du nombre de nœuds vivants résultant de l'application du nouveau protocole WRE-OLSR, de même, a engendré la diminution des paquets perdus et ceci en augmentant la probabilité de router les paquets avec succès vu la multitude de chemins disponibles.

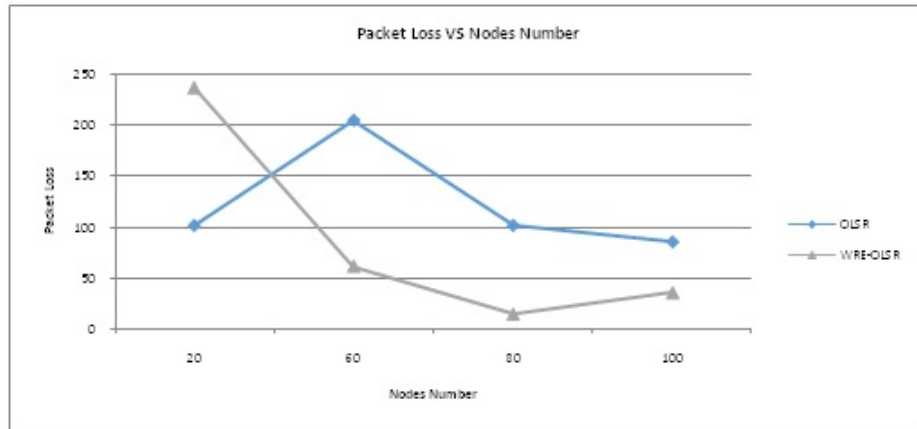


FIGURE 4.16 – Effet de la densité du réseau sur le nombres des paquets perdus

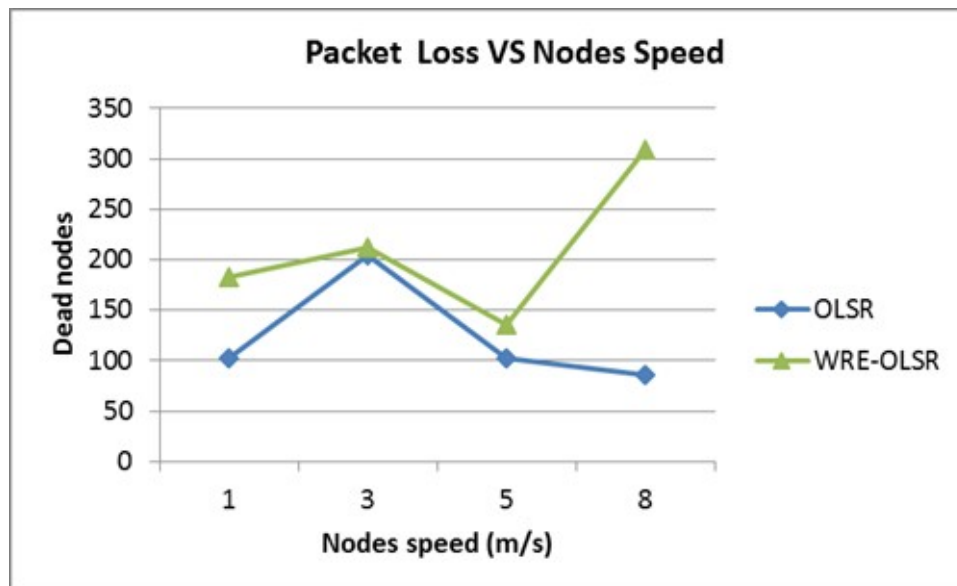


FIGURE 4.17 – effet de la mobilité du réseau sur le nombre de noeuds morts

À travers toutes les simulations effectuées, il demeure clair que la qualité de service QoS obtenue dans le cas du protocole WRE-OLSR est nettement meilleure que celle du protocole OLSR basique. Aussi, cette qualité de service est constatée clairement par rapport à la densité et la mobilité du réseau. Ceci dit, le protocole WRE-OLSR demeure transparent par rapport au changement des caractéristiques physiques du réseau AHWSN, car son objectif principal est de répartir la charge sur l'ensemble des nœuds afin d'optimiser leurs énergies résiduelles et de ce fait augmenter la durée de vie du réseau. Enfin, cette première contribution publiée dans (Belkhira2019wre), traite le protocole WRE-OLSR et son apport sur la qualité de service dans les réseaux adhoc mobiles et les reseaux AHWSN. Ce premier protocole intervient principalement lorsque l'énergie résiduelle des nœuds atteint un niveau bas, afin d'équilibrer la charge du réseau et de maintenir un nombre suffisant de relais multipoints, responsables de router l'information. Pour se faire, l'heuristique choisie se base principalement sur l'ensemble « MPR » qui est un des attributs du

nœud mobile et qui détermine le nombre de nœuds qui ont sélectionné ce dernier comme MPR. À travers les simulations effectuées, le maintien d'un nombre suffisant de MPRs, limitera l'inondation inutile des messages de contrôle à travers le réseau entier. Car la plus grande énergie consommée demeure dans la transmission des paquets. Ceci a bien été confirmé par les différentes simulations effectuées, où nous avons démontré que les différentes métriques de la QoS ont été améliorées, spécialement dans le cas où le nombre des nœuds devient important ou le réseau demeure fortement mobile. Les simulations effectuées ont démontré une optimisation entre 30% à 57% en termes de nombre des nœuds morts *dead nodes*, ce qui explique que l'énergie totale consommée est nettement optimisée. En conclusion, notre nouveau protocole WRE-OLSR, permet une nette optimisation dans le cas d'un réseau AHWSN dense et fortement mobile, ainsi les paquets sont acheminés à travers des routes optimales en termes d'énergie entre la source et la destination. Ceci éliminera davantage les congestions et la charge sera uniformément distribuée à travers le réseau.

4.8 PROTOCOLE WRE-OLSR+

La section précédente a détaillé la technique implémentée sur le protocole OLSR afin d'apporter des améliorations sur la qualité de service QoS d'un réseau AHWSN. Il s'agit essentiellement d'introduire l'énergie résiduelle des nœuds du réseau comme critère de choix des relais MPRs. À travers les différentes simulations effectuées, une nette amélioration de la qualité de service a été constatée, en implémentant le nouveau protocole proposé WRE-OLSR. Cette section détaille un autre travail visant principalement la durée de vie du réseau. Cette dernière demeure sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau adhoc ou AWSN. En effet, dans un environnement contraint, toute ressource limitée doit être prise en compte. Toutefois, la durée de vie du réseau, comme mesure de la consommation d'énergie, occupe une place exceptionnelle puisqu'elle constitue la borne supérieure de l'utilité de ce réseau. Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire et à équilibrer la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à piles continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

Aussi, cette section présente les différentes modifications apportées sur le protocole WRE-OLSR décrit dans la section précédente afin d'accroître la durée de vie du réseau AHWSN et d'équilibrer la charge entre les différents nœuds du voisinage à un saut, le nouveau protocole résultant et baptisé WRE-OLSR+.

Dans la première contribution, le choix du paramètre w a été fait en se basant sur la simulation en recherchant la valeur qui garantit le plus d'amélioration dans les paramètres de la qualité de service. Les résultats de simulation ont conclut une valeur de $w = 0.5$. Cette valeur a permis d'avoir les meilleurs résultats et d'améliorer la durée de vie du réseau ainsi que une nette diminution des paquets perdus comparé à l'OLSR basique (Belkhira *et al.* 2019). Cette valeur du paramètre w a été la même pour tous les nœuds du réseau, quel que soit l'état énergétique de leur

voisinage. Toutefois, il fallait chercher une méthode de calcul dynamique de ce paramètre afin d'améliorer d'avantage le protocole WRE-OLSR.

De cette manière et dans quelque cas, on peut exiger à un nœud dont l'état énergétique de son voisinage demeure homogène, de basculer des MPRs autres que ceux élus par l'OLSR basique. Ces derniers sont généralement les biens placés avec le maximum de connexions bien que la situation ne nécessite pas encore leur remplacement. Contrairement, on peut exiger à un nœud avec un état énergétique déséquilibré de son voisinage de maintenir les MPRs présentant une énergie très faible bien que la situation nécessite un basculement vers d'autres nœuds qui ont relativement plus d'énergie pour permettre d'équilibrer la charge et de soulager les nœuds souffrant d'une diminution de leurs énergies résiduelles et de les maintenir vivants le plus longtemps possible.

L'idée dans cette deuxième approche est de rendre le paramètre w dynamique et calculable. De cette manière, chaque nœud peut adapter le paramètre w à l'état énergétique de son voisinage d'une façon autonome, cela permet à chaque nœud de préserver l'équilibre énergétique de son voisinage.

Afin de permettre à ce paramètre de remédier rapidement au déséquilibre énergétique dû à la non-répartition de la charge ou à l'entrée des nouveaux nœuds dans le voisinage, une fonction mathématique de calcul du paramètre w a été développé. Cette dernière doit prendre en compte l'état énergétique du voisinage pour l'augmentation et / ou la diminution du paramètre w , selon le cas, dans le but de remédier, rapidement, le déséquilibre énergétique.

Pour pouvoir réaliser ce mécanisme, des techniques de mesure de dispersion employées dans le domaine du statistique, ont été utilisées afin de mesurer le degré de dispersion des énergies du voisinage à un saut de chaque nœud afin de pouvoir se servir de cette information pour le calcul du paramètre w . Il existe plusieurs indicateurs de dispersion, le cas de ce travail un indicateur très utilisé dans le domaine des statistiques qui est l'écart type, a été utilisé, basé sur le calcul de la moyenne des distances euclidiennes entre les valeurs des échantions étudiés et leur moyenne. L'écart-type sert à mesurer la dispersion, ou l'étalement, d'un ensemble de valeurs autour de leur moyenne. Plus l'écart-type est faible, plus la population est homogène. Il peut être calculé à travers la formule suivante :

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.10)$$

Ou :

- x_i : représente les valeurs de la population étudiée
- \bar{x} : La moyenne des valeurs de la population
- n : le nombre des éléments de la population

La valeur de l'écart type appartient au même intervalle que les valeurs des populations étudiées.

La technique consiste à calculer le degré de dispersion entre les valeurs des énergies du voisinage à un saut de chaque nœud. Ce paramètre permet au nœud de déterminer le taux de dispersion des énergies de leur voisinage et de calculer le paramètre W en fonction de cet indice, ce qui

lui permet de réguler le déséquilibre énergétique de son voisinage dû au choix permanent des nœuds qui ont le plus grand nombre de connexions comme MPR, la valeur de w permet au nœud de choisir parmi son voisinage, les nœuds qui ont plus d'énergie dans le but d'équilibrer la charge de tâche MPR sur tous les nœuds du voisinage à un saut $N1(X)$, comme illustre la figure 4.18.

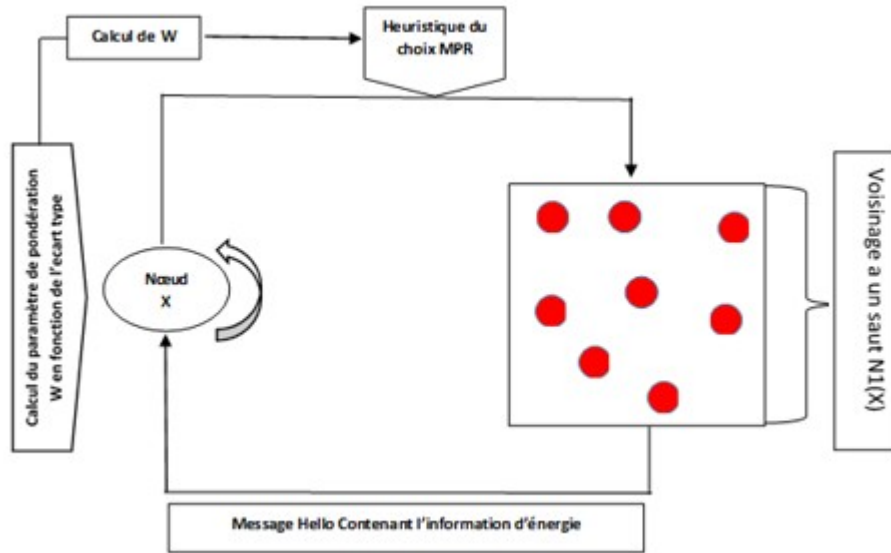


FIGURE 4.18 – Mécanisme d'équilibrage de charge par mesure de dispersion

Cette technique permet : de conserver le maximum de nœuds vivant le plus longtemps possible et d'augmenter ainsi la durée de vie ; de conserver le maximum de chemins possibles dans le réseau ; d'améliorer d'autres critères de QoS tels que le délai de bout en bout ; de diminuer le nombre de paquets perdus. Lorsque le nœud atteint l'équilibre énergétique de son voisinage, il diminue la valeur de w à nouveau pour permettre d'exploiter les nœuds bien placés de son voisinage comme MPR. L'équilibrage énergétique contribue à l'augmentation de la durée de vie toute en préservant le maximum des critères de la qualité de service.

La valeur de l'écart type peut donc nous fournir une image claire de l'état énergétique du voisinage d'un nœud. Lorsque la valeur de l'écart-type augmente, veut dire que le voisinage nécessite une régulation du poids de l'énergie résiduelle représenté par le paramètre $w \in [0,1]$. La nouvelle reachability sera calculée à l'aide de la formule 4.11 :

$$R' = w * R + (1 - w) * E \quad (4.11)$$

Le paramètre w est calculé en fonction de l'écart type des énergies du voisinage à un saut. Quand la dispersion est importante, les valeurs des énergies sont dispersées. Dans ce cas, il faut faire intervenir les nœuds qui ont le plus d'énergie pour pousser le protocole OLSR à les choisir comme MPR et préserver l'énergie des autres nœuds qui ont fait fonction d'MPR et cela par l'augmentation de la valeur de w , permettant de ce fait à la fois

d'augmenter le poids de l'énergie et de diminuer le poids de la reachability.

Prenons F (écart) une fonction de la forme $Ax^2 + B$. Cette fonction est connue par sa forte croissance et la possibilité de la paramétrer facilement à travers les deux paramètres A et B . ceci afin d'avoir la meilleure régulation. Le paramètre B représente le minimum que doit assurer la fonction dans le cas où l'écart est égal à 0. Cela veut dire que les noeuds ont la même valeur de l'énergie. Le paramètre A , quant à lui, il peut réguler le taux de croissance de la fonction afin de réagir convenablement à la variation de l'écart type des énergies et de pouvoir réguler la fonction pour rétablir l'équilibre énergétique, tout en favorisant d'autres noeuds qui ont plus d'énergie. En plus, le max de f (écart) peut être paramétré en fonction de la variation de l'écart. Il est précédemment cité que nous avons démontré que les valeurs de w comprises entre 0,4 et 0,6 donnent les meilleurs résultats du fonctionnement de WRE-OLSR en terme de QoS du réseau. Donc les paramètres A et B seront configuré selon la variation de l'écart type, tout en gardant les valeurs de W entre 0,6 et 0,4.

L'écart type a été calculé par la fonction 4.12 :

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (4.12)$$

Avec :

- E_i : l'énergie résiduelle d'un noeud i
- \bar{E} : la moyenne des énergies des noeuds du voisinage à un saut
- n : le nombre des noeuds dans le voisinage à un saut.

De ce fait, la valeur de l'écart et ainsi que le paramètre de pondération W dépendent directement du degré de dispersion des énergies du voisinage qui représente le taux de l'équilibre énergétique.

La figure suivante représente la variation de l'écart type en fonction du temps sans aucune influence du paramètre W qui égale à 0 (OLSR original). Le tableau montre que l'écart varie entre 0 et 0.17, donc il faut paramétrer notre fonction selon ces conditions.

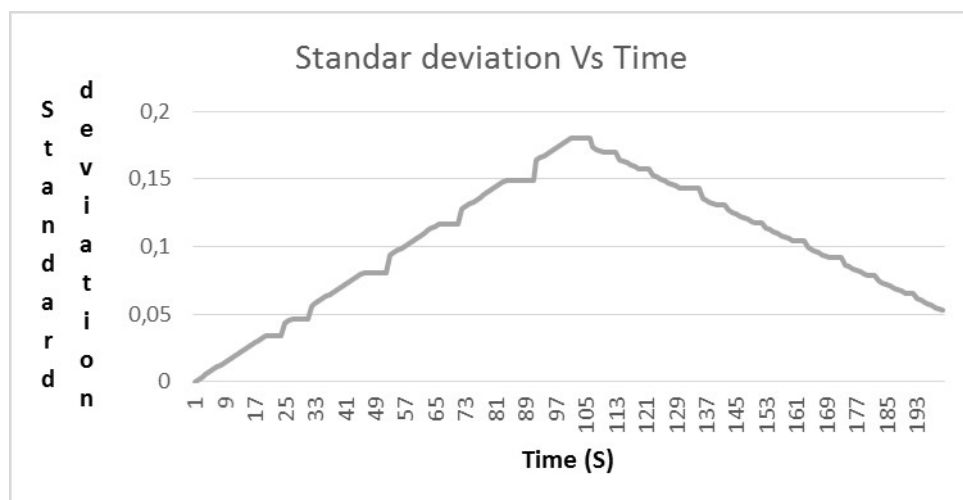


FIGURE 4.19 – Variation de l'écart-type dans le temps

4.8.1 Nouvelle fonction pour calculer le paramètre de pondération w

La fonction sera initialisée par une valeur de 0,3 et peut atteindre au maximum la valeur 0,7.

Dans la section précédente la valeur du coefficient B a été déterminé pour assurer la valeur minimale du paramètre de pondération w $B=0,3$. La valeur du coefficient A a été calculée comme suite :

$$W = 0.18^2 * A + 0.3 = 0.6 \Rightarrow A = 9.26$$

La fonction $w=f(\text{écart})$ a été paramétré comme suit :

$$w = f(\text{ecart}) = 9,26 * \text{ecart}^2 + 0,3 \quad (4.13)$$

La figure suivante représente le graphe de variation de la fonction de $w=f(\text{écart})$

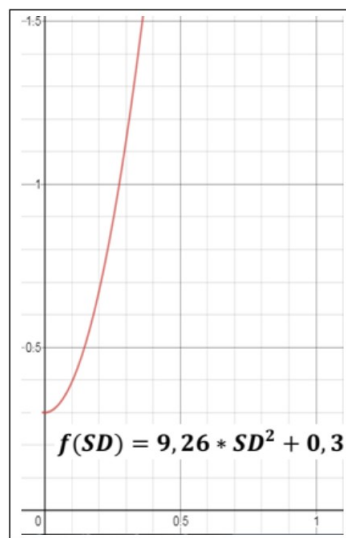


FIGURE 4.20 – Graphe de $w=f(\text{écart})$

4.8.2 Résultats et discussions

En tenant compte de ce qui a été déjà expliqué par la section précédente, le nouveau algorithme de calcul des MPRs sera comme suit :

Algorithme 7 : Nouveau algorithme de l'heuristique

```

For all nodes  $x \in N$ 
Step1 : For each node  $y \in N(x)$ 
If ( $z \in N(y) \cap N_2(x) D_x(z) == 1$ ) then
select y as MPR
/* select as MPR (x) nodes for which there is a node of  $N_2(x)$ 
which has y as single parent in  $N(x)^*$  */
Remove y from N and remove
 $N(y) \cap N_2(x)$  from  $N_2(x)$ 
End
While ( $N_2(x) \neq \emptyset$ )
Step2 : For each node  $y \in N(x)$ 
If ( $R'(y) = \max(z \in N(x)) R'(z)$ ) then
select y as MPR(x)
/* select as MPR(x) the node y which cover the maximal nombre
of nodes in  $N_2(x)^*$  */
Remove y from N(x) and remove  $N(y) \cap N_2(x)$  from  $N_2(x)^*$ 

```

Avec :

$$R'(y) = (w * E^n) + \frac{[(1 - w)(D^y)(x)]}{|N_2(x)|} \quad (4.14)$$

Ce nouveau mécanisme a été illustré à travers l'exemple ci-dessous :

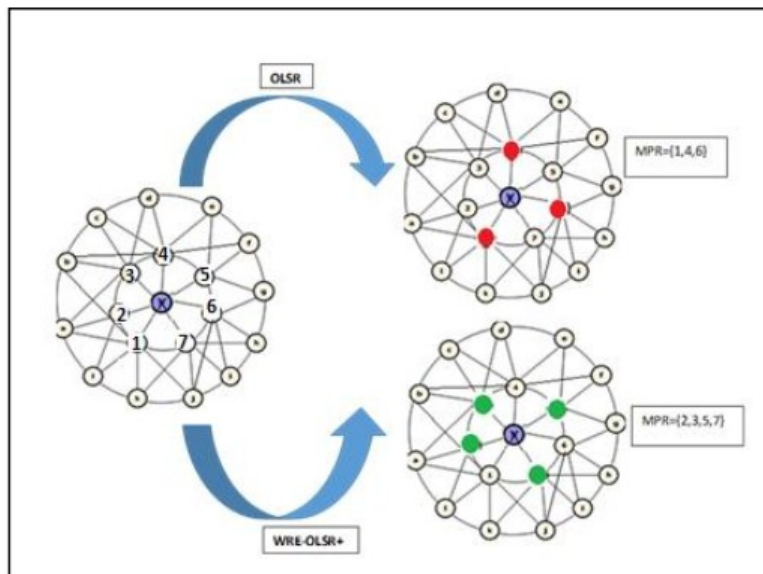


FIGURE 4.21 – Exemple de fonctionnement de WRE-OLSR+

Il est déjà démontré que l'ensemble MPR n'est pas unique sauf dans le cas des MPR qui relient les nœuds isolés (Fig.4.22).

Node performing selection	1-hop neighbors	Reachability degree	Residual Energy	MPRs set using OLSR	MPRs set using WRE-OLSR+
X	1	3	20%	1	
	2	3	55%		2
	3	4	60%		3
	4	5	25%	4	
	5	3	65%		5
	6	4	20%	6	
	7	4	55%		7
	Average residual energy value	\bar{X}	43%		
	Standard deviation	SD	0.18		

FIGURE 4.22 – Comparaison entre les MPRs qui utilisent OLSR et les MPRs qui utilisent WRE-OLSR+

En calculant le nouveau paramètre de pondération dynamique W basé sur la valeur de l'écart type entre les énergies du voisinage à un saut, le noeud x va choisir des nouveaux MPRs comme illustré par la figure en se basant à la fois sur l'énergie résiduelle et la reachability. Par cette méthode, un équilibre énergétique peut être assuré et qui à son tour peut améliorer la durée de vie des nœuds et du réseau.

Afin d'évaluer les performances de la présente nouvelle méthode, les mêmes paramètres de simulation que pour WRE-OLSR ont été conservés. Plusieurs simulations ont été effectuées en faisant varier les paramètres du réseau ; tels que la densité du réseau (le nombre du nœud) et la mobilité (la vitesse des nœuds). Les autres paramètres de simulation sont récapitulés dans le tableau 4.3 :

TABLE 4.3 – Paramètres de simulation d'OLSR et WRE-OLSR sous NS-2

Type de trafic	CBR	CBR	CBR
Nombre de connexions	14	14	10, 12, 14, 16, 18
Débit	2 paquets/s	2 paquets/s	2 paquets/s
Énergie initiale	100 joules	100 joules	100 joules
Protocole de routage	OLSR et WRE-OLSR	OLSR et WRE-OLSR	OLSR et WRE-OLSR

L'évaluation de la nouvelle version baptisée WRE-OLSR+ comparée à celle de l'OLSR, a été basée sur les mêmes paramètres de la QoS détaillés précédemment, à savoir ; la durée de vie du réseau, le délai de bout en bout et le taux de paquets perdus. Tout fois, et ayant d'entamer les simulations il fallait analyser l'effet du WRE-OLSR+ (Belkhiria *et al.* 2020) sur l'écart type du voisinage pour un nœud x (Fig 4.23).

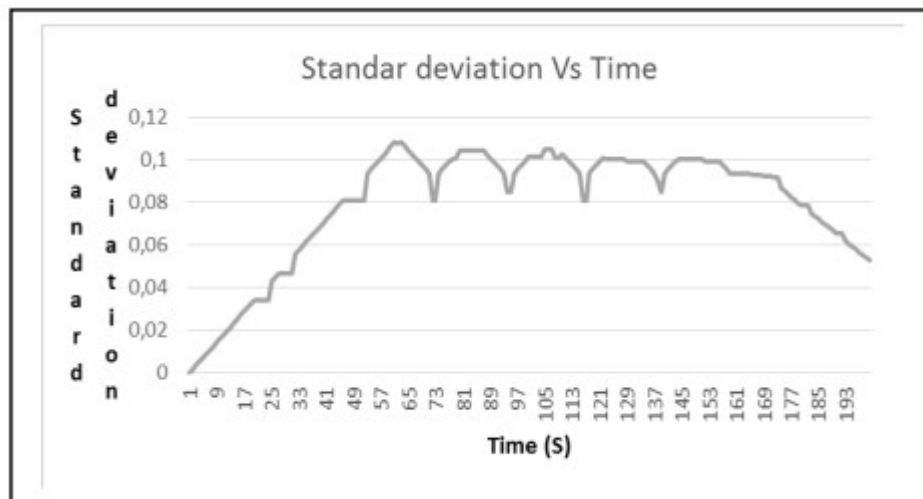


FIGURE 4.23 – variation de l'écart type des énergies en fonction du temps

Il est clair que le WRE-OLSR+(Belkhira *et al.* 2020) a permis de stabiliser l'écart type qui représente la dispersion des énergies du voisinage et qui oscille au tour de la valeur 0,1. Notre nouveau mécanisme a permis de réagir à la dispersion des énergies en basculant vers des nouveaux MPR ayant plus d'énergie ce qui permet un équilibrage de charge entre les différents nœuds du voisinage. La diminution des énergies des différents nœuds va se faire progressivement et équitablement, ce qui permet de garder le max de nœud du réseau en vie. La chose qui va influencer directement sur la durée de vie des réseaux et indirectement sur les autres paramètres tels que le délai de bout en bout et le nombre de paquets perdus.

Comme il a été déjà évoqué, trois métriques, à savoir, le délai de bout en bout, le nombre de nœuds morts et le taux de paquets perdus, ont été utilisés comme critères d'évaluation des deux nouvelles versions du protocole OLSR (WRE-OLSR, WRE-OLSR+) proposées lors de ce présent travail. En effet, ces métriques décrivent les performances en termes de qualité de service du réseau.

L'heuristique de calcul des MPRs, des deux nouvelles versions du protocole OLSR proposées, a été modifiée afin de tenir compte de l'énergie des nœuds dans la décision et le choix des MPRs. Ce nouveau mécanisme permet de sélectionner les nœuds possédant une énergie résiduelle suffisante pour jouer le rôle des MPR et garantir ainsi la transmission efficace des données à travers le réseau tout en assurant une bonne répartition de la charge.

Les différents travaux de simulations réalisés dans le cadre des présentes nouvelles modifications ont donné les résultats ci-après.

4.8.3 Évaluation des paramètres de la QoS

4.8.3.1 Nombre de nœuds morts

Lors de la deuxième simulation, celle de WRE-OLS+, le nombre des nœuds morts dont l'énergie résiduelle inférieure à 5% et qui affecte direc-

tement la durée de vie du réseau, ce nombre, en variant la densité (20, 60, 80, 100), a exhibé respectivement des nombre de l'ordre de (0,15,20,40), ce qui montre une diminution par rapport à ce qui est donné lors de la simulation de l'WRE-OLSR (1,19,24,31) et OLSR basique (8,56,80,91). Cette diminution est le résultat de la distribution uniforme de la charge de l'énergie résiduelle et conduit ainsi à l'augmentation de la durée de vie du réseau en testant le protocole WRE-OLSR+ (Fig 4.24).

Le nombre des nœuds morts, en variant la mobilité des nœuds du réseau (1,3, 5 et 8 m/s), a exhibé des nombre de l'ordre de (6, 20, 7,20), ce qui montre une diminution de ce dernier au sein du réseau, lorsqu'il est comparé avec les deux versions de protocole; de l'ordre de (9, 25, 9,24) pour WRE-OLSR et d'environ (7,49 ,59 et 50) pour OLSR basique. Cette diminution est due toujours à la charge équilibrée de l'énergie des batteries suite à l'application du protocole WRE-OLSR+ qui affecte positivement la qualité de service du réseau et sa durée de vie (Fig 4.25).

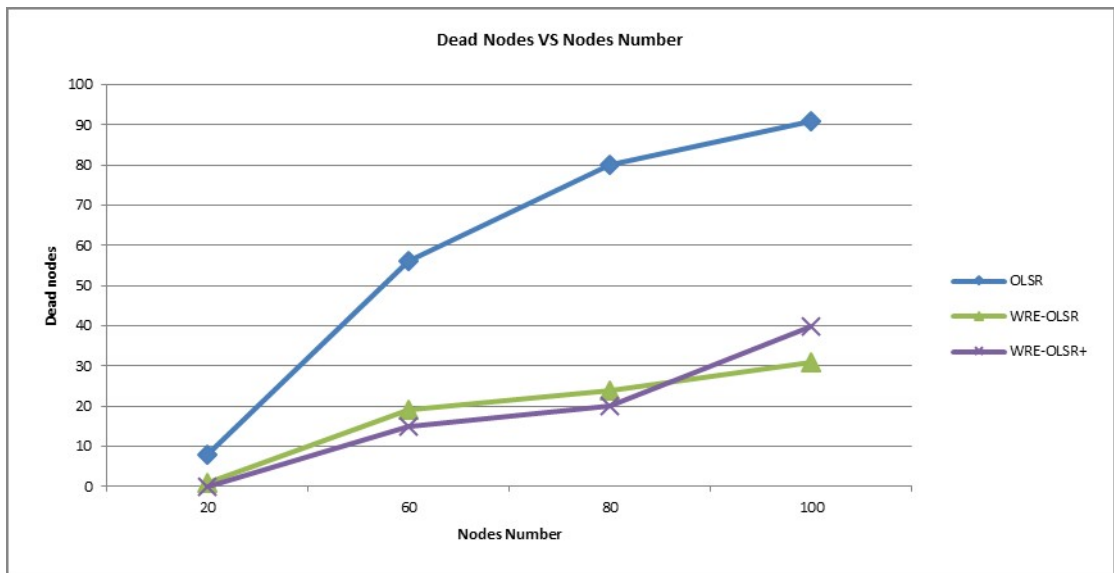


FIGURE 4.24 – l'effet de la densité sur les noeuds morts

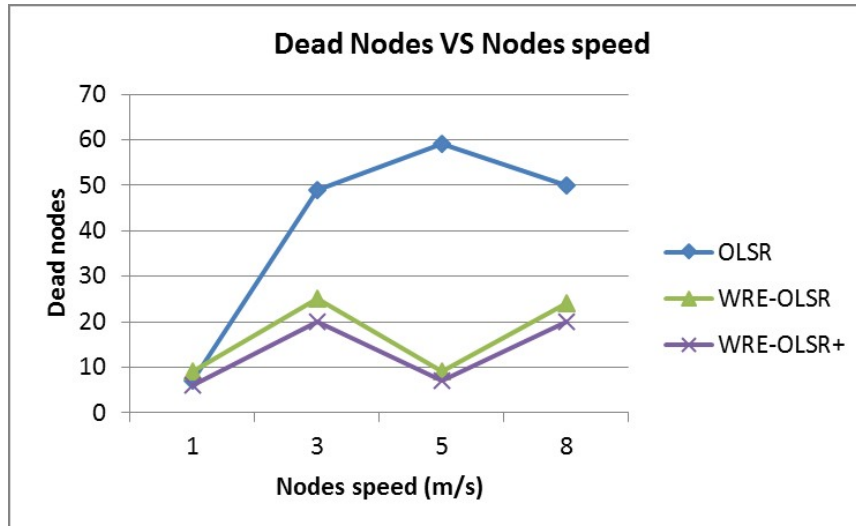


FIGURE 4.25 – l'effet de la vitesse sur les noeuds morts

4.8.3.2 L'effet de la densité du réseau sur le nombre de paquets de contrôle

En fait variant la densité du réseau (20, 60, 80, 100), le nombre de paquets de routage et ou de contrôle overhead (messages HELLO et TC) ont montrés une légère augmentation de l'ordre de (6600, 29729, 41247, 51101). Ce nombre de paquets ont été d'environ (5781, 26505, 37519, 47146) pour WRE-OLSR et (6803, 29452, 43493, 52478) pour OLSR basique. L'augmentation de messages de contrôle au sein du réseau par l'application du protocole WRE-OLSR+ est suite à l'augmentation du nombre de nœuds vivants dans le réseau en engendrant la diffusion des messages Hello et TC (Fig 4.26).

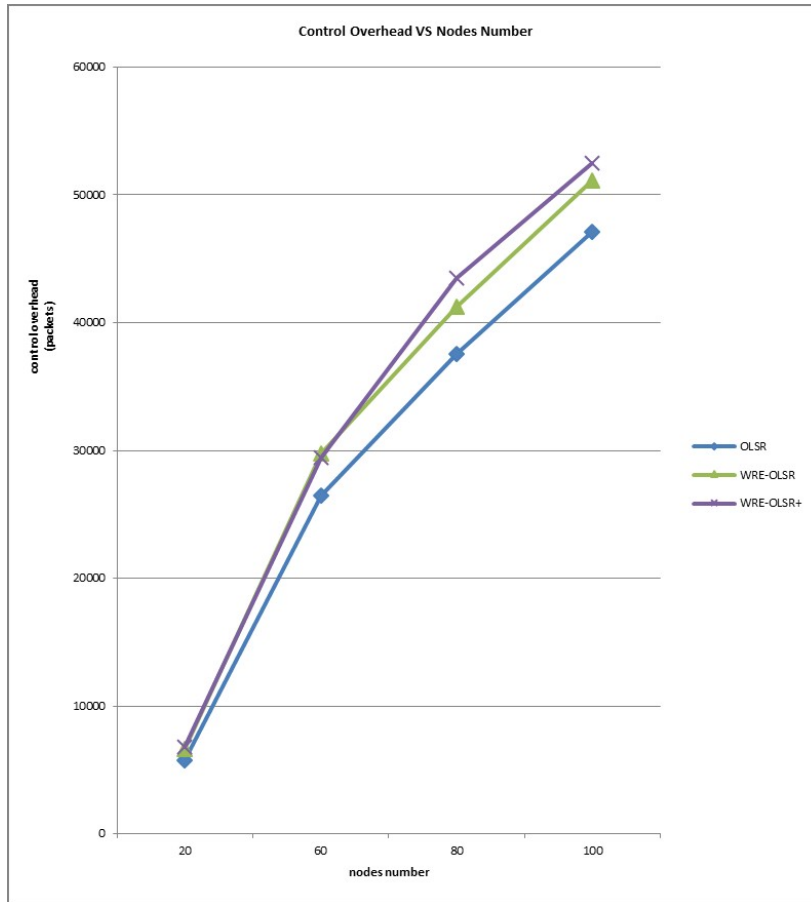


FIGURE 4.26 – l'effet de la densité sur la surcharge

4.8.3.3 L'effet de la densité du réseau sur le nombre de paquets perdus

Le test de différents nombres de nœuds (20, 60, 80,100) sur la métrique d'évaluation packet-loss a montré une diminution du nombre de paquets perdus d'environ %, remarquable, à partir de la densité 60, s'agit des deux dernières densités, celles-ci on donnés une diminution de (15,36) pour WRE-OLSR par apport a (102,86) pour OLSR, ceci a l'exception de la densité 20. Ce résultat a réduit, au départ, le taux de la retransmission, puis cela a conduit à une conservation de l'énergie résiduelle des nœuds et par la suite à une augmentation la durée de vie de réseau. Ce résultat d'amélioration, confirme, toujours, que l'équilibre de charge entre les diffèrent nœuds du réseau permet de garder un nombre plus important de nœuds vivant ce qui donne la possibilité d'avoir des chemins fiables afin d'assuré l'acheminement de maximum de paquets(Fig 4.27).

Les résultats du test de la mobilité sur le paramètre des paquets perdus a affiché une diminution en nombre de ces derniers d'environ (183,212,135,309) pour WRE-OLSR et de (102,204,102,86) pour OLSR dans le même ordre des vitesses (Fig 4.28). Comme précédemment cité l'augmentation du nombre de nœuds vivant résultante de l'application du nouveau protocole WRE-OLSR, de même, a influencé cette métrique par

diminution des paquets perdus à cause de l'augmentations de la probabilité de délivrer les paquets avec succès vu la multitude de chemins disponibles.

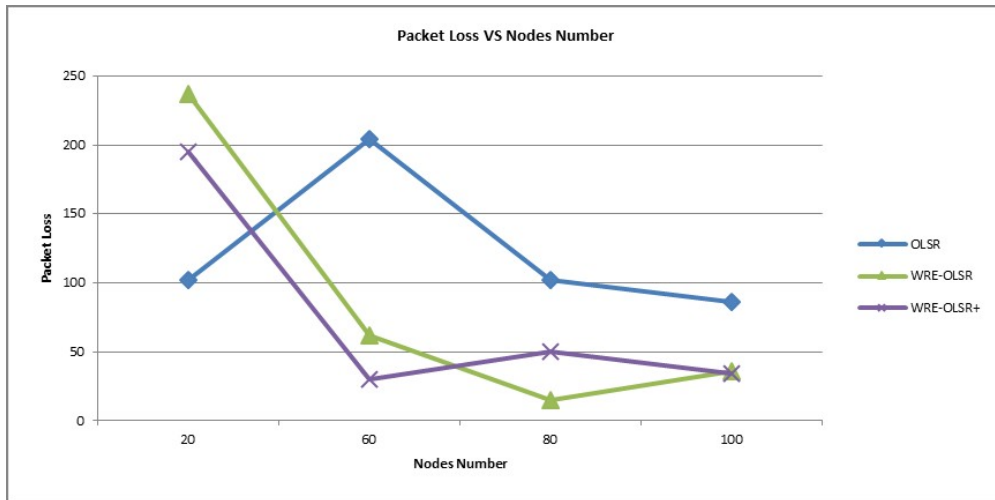


FIGURE 4.27 – Effet de densité de nœuds sur paquet perdu

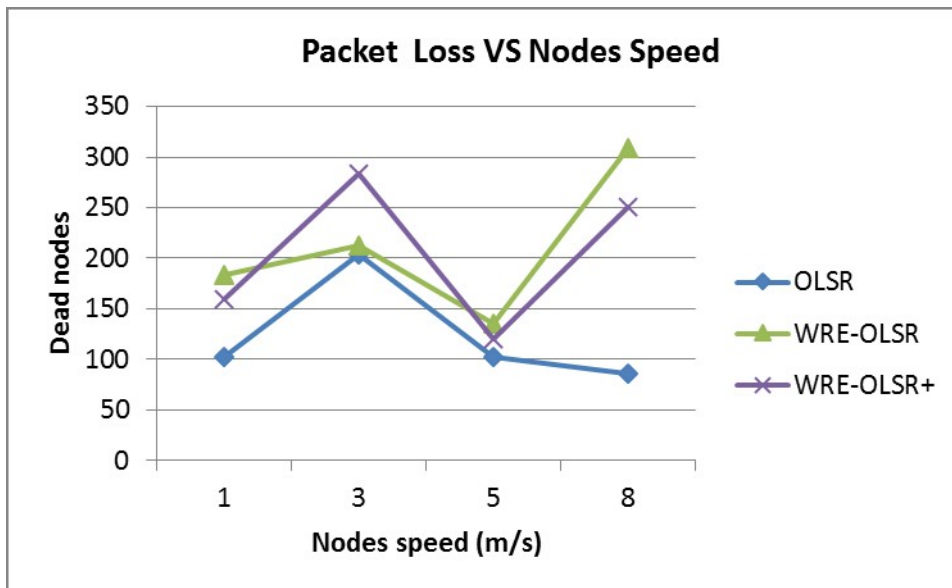


FIGURE 4.28 – Effet de la vitesse du nœud sur le paquet perdu

4.8.3.4 L'effet de la densité du réseau sur le délai (AVG end-end delay) :

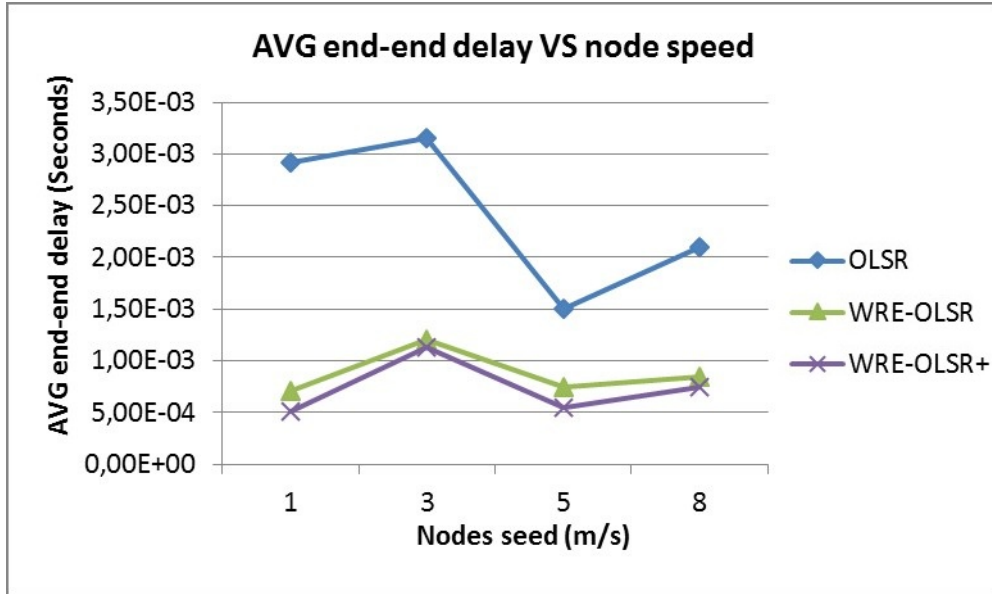


FIGURE 4.29 – Effet de la vitesse du nœud sur le délai moyen de bout en bout

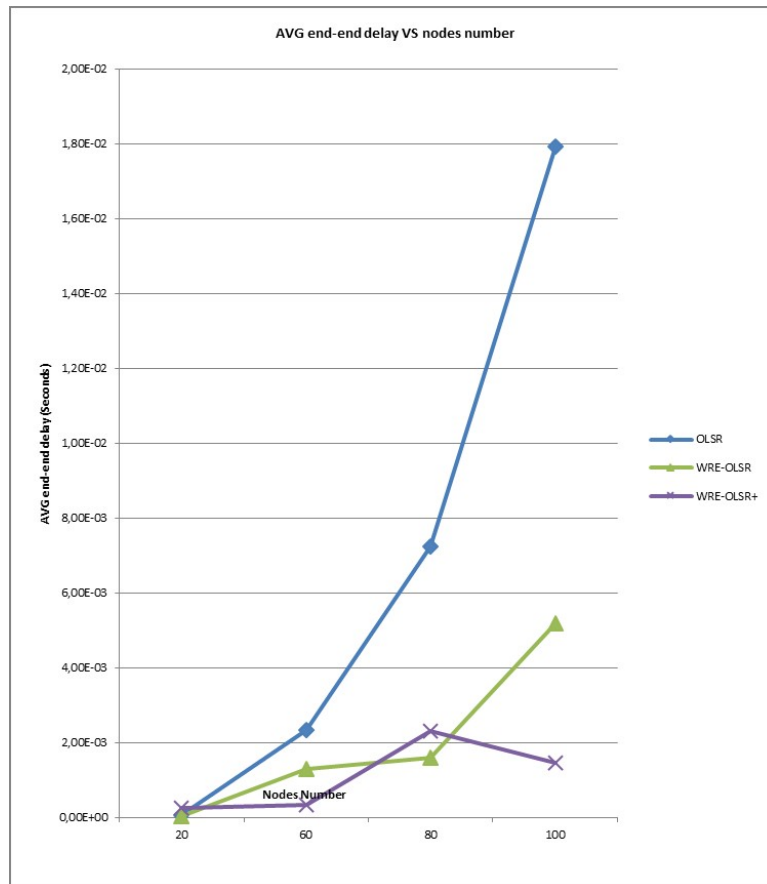


FIGURE 4.30 – Effet de la densité des nœuds sur le délai moyen de bout en bout

4.9 CONCLUSION

Dans le présent chapitre nous avons présenté notre travail, publié dans (Belkhira *et al.* 2019) relatif au protocole WRE-OLSR et son apport sur les différents critères de la QoS réseau adhoc et réseau AHWSN ce protocole présente un mécanisme de choix d'MPRs dans le protocole OLSR basé sur l'introduction du paramètre d'énergies résiduel comme critères de choix de ces nœuds par l'introduction d'un paramètre de pondération entre la reachability et l'énergies résiduelle chose qui ont une très grande influence sur le bon fonctionnement du réseaux et la prolongation de sa durée de vie, le choix de ce paramètre était basée sur des résultats de simulation et fixé pour tous les nœuds du réseaux. La deuxième contribution quand a elle avait comme but de développer une nouvelle version nommée WRE-OLSR+ de rendre le paramètre de pondération qui détermine le poids de l'énergie dans la détermination des MPR dynamique en introduisant une technique de mesure de dispersion comme baromètre de mesure d'homogénéité des énergies du voisinage afin de bien équilibré la charge sur les différents nœuds du réseaux dans le but d'améliorer les paramètre de la qualité de service ainsi que la durée de vie du réseau.

À travers toutes les simulations effectuées, il demeure clair que la qualité de service QoS obtenue dans le cas du protocole WRE-OLSR est nettement meilleure que celle du protocole OLSR basique. Aussi, cette qualité est transparente par rapport à la densité ou la mobilité du réseau. Ceci dit, le protocole WRE-OLSR demeure transparent par rapport au changement des caractéristiques physiques du réseau AHWSN, car son objectif principal est de répartir la charge sur l'ensemble des nœuds afin d'optimiser leurs consommations d'énergie et augmenter la durée de vie du réseau.

Enfin, cette présente version du protocole OLSR (WRE-OLSR+) (?) a été proposée pour but d'augmenter la durée de vie du réseau. L'idée principale repose sur un paramètre de pondération dynamique entre l'énergie résiduelle et la reachability. Le calcul de ce paramètre de pondération a été basé sur la mesure de dispersion entre les énergies des nœuds du voisinage en utilisant l'écart type comme paramètre de mesure de cette dispersion. Par ce mécanisme de sélection des MPRs, le nœud garde la dispersion des énergies de ces voisins le moins possible, on basculant à chaque fois vers des nœuds qui ont plus d'énergie dans le cas où l'écart énergétique devient important ce qui permet d'atteindre un équilibrage de charge et un équilibre énergétique. Aussi il a permet d'améliorer considérablement la durée de vie du réseau et d'améliorer d'autre paramètre de la QoS tel que le délai de bout en bout et le nombre de paquets perdu note nouvelle approche rend le protocole OLSR plus concourant et efficace dans les réseaux a grande densité et mobilité.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

L'essor technologique et la forte implication des réseaux mobiles ad hoc et des réseaux de capteurs dans tous les secteurs, relèvent des défis énormes et incitent les chercheurs à instaurer et développer de nouveaux mécanismes qui s'adaptent aux différentes contraintes de déploiement de ces réseaux. De par leur facilité de déploiement et de mise en œuvre, les réseaux AHWSN présentent diverses contraintes qui doivent être prises en considération. Ceci est principalement dû à la capacité limitée de ces unités mobiles (capacité de traitement, stockage, batterie limitée) et leurs façons de s'interconnecter. Dans plusieurs situations, la forte densité la mobilité de ces réseaux imposent davantage de défis en vue introduire de nouvelles approches de la mise en réseau de ces dispositifs, si nous voulons que ces types de réseaux soient compétitifs à leurs concurrents filaires et cellulaires. Les contraintes liées aux réseaux AHWSN devront être traitées à tous les niveaux du modèle OSI, en allant de la couche physique à la couche application. La qualité de service (QoS) définit un ensemble de critères et métriques permettant de mesurer le degré d'efficacité d'un réseau à transmettre les données, d'une manière fiable et sûre, de la source à la destination. Le réseau AHWSN devra garantir un ensemble d'exigences des utilisateurs, notamment en termes délai de bout en bout, de la sécurité des données et de la durée de vie du réseau, sachant que dans plusieurs situations les nœuds mobiles fonctionnent sur batterie et sont installés dans des zones hasardeuses qui entravent leur maintenance et mise à jour. A cet effet, et parmi les défis des réseaux AHWSN est comment vivre le plus longtemps que possible? Notre travail durant cette thèse, s'est axé principalement sur la contrainte d'énergie et l'optimisation des ressources des dispositifs mobiles dans la partie routage de l'information (niveau 3 du modèle), qui demeure le noyau de l'échange des données dans un réseau. L'infrastructure des réseaux AHWSN est définie plate, où tous les nœuds doivent participer dans le routage des données. Dans notre cas, le protocole « OLSR » défini dans la RFC 3626 de l'IETF, est parmi les protocoles qui sont communément implémentés dans les réseaux AHWSN. Il repose sur la notion des relais multipoints « MPRs » responsables à interconnecter les autres nœuds du réseau. Ce mécanisme présente un avantage majeur qui est de limiter l'inondation et la diffusion des paquets de contrôle dans le réseau. Les paquets de contrôle se limiteront à la responsabilité des « MPRs ». Durant notre thèse, nous avons détaillé son fonctionnement, ses avantages ainsi que ses limitations. Dans l'OLSR basique le choix des

« MPRs » s'articule principalement sur la position du nœud dans le réseau et son degré de couverture et ne tient pas compte de la contrainte énergétique de ces derniers. La forte sollicitation des nœuds stratégiques dans le réseau épuise drastiquement leur capacité énergétique, engendre la création des trous et par conséquent, nuit fortement à la stabilité du réseau. La première approche de notre travail a été baptisée « WRE-OLSR » [119], consistant à modifier l'heuristique de l'élection des MPRs, en introduisant l'information de l'énergie résiduelle du nœud, additivement à celle de sa position. En effet, l'information sur le pourcentage de la batterie du nœud a été insérer dans les champs « reserved » des paquets de contrôle « HELLO » et « TC ». Par cette méthode, tous les nœuds auront une base d'information sur la capacité intrinsèque de leurs voisins en termes d'énergie résiduelle. L'élection des nœuds « MPRs » se fera par l'introduction d'une pondération entre l'énergie résiduelle de chaque et son degré de couverture. Un nœud avec une capacité limitée en énergie ne pourra participer au routage de l'information. Ce mécanisme assurera un équilibrage de charge et permettra de maintenir un nombre suffisant de « MPRs », principalement lorsque la capacité des nœuds en énergie devient faible. Les première simulations effectuées à travers la plateforme NS-2, étaient de déterminer le paramètre « W » qui définit la pondération entre les deux critères à savoir : « Energy » et « Reachability ». Les résultats de des simulations ont révélé que le paramètre W devra être pris dans l'intervalle [0,4 – 0,6]. Ensuite, plusieurs métriques de la QoS ont été évaluées à savoir : le délai de bout en bout, le nombre des nœuds morts (dead nodes), le nombre de paquets de contrôle (Control overhead) et le nombre des paquets perdus (packet-loss). Les différents scénarios de simulations retenus, en variant la densité du réseau (nombre de nœuds) et sa mobilité (vitesse des nœuds), ont conclu que toutes les métriques de la QoS précitées ont été améliorées, sans pour autant additionner un control overhead important. L'augmentation de ce dernier demeure claire, puisque le fait que le réseau demeure opérationnel le plus longtemps que possible et en implémentant un protocole proactif comme OLSR, les nœuds s'échanges implicitement du control overhead pour découvrir davantage leur voisinage et construire leurs tables de routage. Toutefois, cette légère augmentation ne nuit pas à la consommation énergétique globale du réseau. Le nombre des nœuds morts our « dead nodes » est une métrique prépondérante afin de mesure la durée de vie du réseau. Ce paramètre a été nettement amélioré à travers les différentes simulations effectué, surtout dans le cas où le réseau demeure nettement dense et fortement mobile. Afin d'automatiser le choix du paramètre « W » de pondération entre l'énergie de chaque et son degré de couverture, une deuxième approche baptisée « WRE-OLSR », consistant à introduire la mesure de dispersion des énergies du voisinage d'un nœud, où nous avons introduit la notion de « l'écart type » pour mesurer cette dispersion. Par ce mécanisme la nouvelle approche de l'élection des « MPRs » consiste à minimiser davantage la dispersion des énergies du voisinage de chaque nœud du réseau. L'avantage de cette approche est d'assurer une grande efficacité dans l'équilibrage de charge, ce qui a nettement amélioré plusieurs critères de la QoS à savoir : le délai de bout en bout et le nombre des paquets perdus.

PERSPECTIVES

L'OLSR est un protocole de routage à état de lien optimisé, qui peut être amélioré davantage, en tenant compte de la capacité des nœuds en énergie résiduelle dans le processus de sélection des MPRs. Les différentes simulations effectuées ont clairement montré le développement, l'amélioration et l'efficacité des deux nouveaux protocoles et par conséquent, ils peuvent être proposés comme solutions pour des réseaux AHWSN denses et fortement mobiles. Toutefois, plusieurs perspectives peuvent être envisagées à l'issue de cette présente étude afin de la consolider, voire de l'améliorer :

- Les performances des deux variantes proposées à savoir : « WREOLSR » et « WRE-OLSR+ », ont été évaluées via des simulations sur la plateforme NS-2. Toutefois, la mise en pratique de ces nouvelles approches sur des plateformes expérimentales, implémentant des scénarios aléatoires proches de la réalité, permet le mieux d'évaluer leurs performances. Ceci permettra d'étayer davantage les hypothèses retenues ;
- Dans les différentes simulations réalisées, 5% ont été prises comme seuil de l'énergie résiduel pour déclarer les nœuds morts. D'autres seuils dynamiques, fixés pour chaque nœud séparément selon sa nature et son estimation peuvent être utilisés afin de voir leurs influences sur les résultats ;
- Des expériences peuvent être menées avec des topologies irrégulières et avec des énergies résiduelles initiales différentes, différents modèles de mobilités peuvent être utilisés afin de se rapprocher de la réalité ;
- Le mécanisme d'équilibrage de charge développer sur les énergies peuvent être appliqué sur d'autre critère tel que le flux de données acheminé par chaque nœud ou la probabilité de pannes afin d'augmenter la fiabilité du réseau ;
- La notion de conservation d'énergies peut être appliquée sur d'autre protocole de routage et adaptée à leur fonctionnement afin d'améliorer leurs performances ;
- Les travaux de cette présente thèse ont été axés sur la couche 3 du modèle OSI. En effet, l'implémentation d'autres techniques d'optimisation dans d'autres niveaux (MAC, application, etc.) et leurs associations à nos approches demeure essentielle afin d'optimiser les ressources du réseau et apporter davantage de gain dans la durée de vie du réseau à plusieurs échelles.

LISTE DES PUBLICATIONS

Journal international

Sid Ahmed Hichame Belkhira, Sofiane Boukli Hacene, Pascal Lorenz, Mohammed Belkheir, Marc Gilg et MerahiBouziani. WRE-OLSR, a new scheme for enhancing the lifetime within ad hoc and wireless sensor networks. International Journal of Communication Systems, page e3975, 2019.

Conference internationale

Sid Ahmed Hichame Belkhira, Sofiane Boukli Hacene, Pascal Lorenz, Mohammed Belkheir, Marc Gilg et Abdelhalim Zerroug, "A new mechanism for MPR selection in mobile ad hoc and sensor wireless networks," IEEE International Conference on Communications 7-11 June 2020 Dublin, Ireland.

BIBLIOGRAPHIE

- [Aad & Castelluccia 2001] Imad Aad et Claude Castelluccia. *Differentiation mechanisms for IEEE 802.11*. In Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No. 01CH37213), volume 1, pages 209–218. IEEE, 2001.
- [Abdellaoui 2009] Rachid Abdellaoui. *SU-OLSR Une Nouvelle Solution Pour La Sécurité Du Protocole OLSR*. PhD thesis, Ecole De Technologie Supérieure Université Du Québec, 2009.
- [ABDELLAOUI 2018] Jamal; BERRADI Halim ABDELLAOUI Ayoub; ELMHAMDI. *Multipoint Relay Selection based on Stability of Spatial Relation in Mobile Ad hoc Networks*. International Journal of Communication Networks and Information Security, vol. 10, no. 1, pages 180–187, 2018.
- [Adibi & Erfani 2006] Sasan Adibi et Shervin Erfani. *A multipath routing survey for mobile ad-hoc networks*. In CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006., volume 2, pages 984–988. IEEE, 2006.
- [Agrawal & Singh 2001] Sandeep Agrawal et Suresh Singh. *An experimental study of TCP's energy consumption over a wireless link*. In 4th European Personal Mobile Communications Conference, pages 20–22, 2001.
- [Ahizoune 2011] Ahmed Ahizoune. *Un protocole de diffusion des messages dans les réseaux véhiculaires*. PhD thesis, Université de Montréal, 2011.
- [Ahn *et al.* 2002] Gahng-Seop Ahn, Andrew T Campbell, Andras Veres et Li-Hsiang Sun. *SWAN : Service differentiation in stateless wireless ad hoc networks*. In Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, volume 2, pages 457–466. IEEE, 2002.
- [Ahn *et al.* 2003] Chang Wook Ahn, Chung Gu Kang et You-ze Cho. *Soft reservation multiple access with priority assignment (SRMA/PA) : A distributed MAC protocol for QoS-guaranteed integrated services in mobile ad-hoc networks*. IEICE Transactions on Communications, vol. 86, no. 1, pages 50–59, 2003.
- [Ahuja *et al.* 2000] Ashish Ahuja, Sulabh Agarwal, Jatinder Pal Singh et Rajeev Shorey. *Performance of TCP over different routing protocols in*

- mobile ad-hoc networks*. In VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37026), volume 3, pages 2315–2319. IEEE, 2000.
- [Aït-Salem 2011a] Boussad Aït-Salem. *Sécurisation des réseaux ad hoc : systèmes de confiance et de détection de répliques*. PhD thesis, Limoges, 2011.
- [AIT-SALEM 2011b] Boussad AIT-SALEM. *Sécurisation des Réseaux Ad hoc : Systèmes de Confiance et de Détection de Répliques*. PhD thesis, UNIVERSITÉ DE LIMOGES, 2011.
- [Akkaya & Younis 2005] Kemal Akkaya et Mohamed Younis. *A survey on routing protocols for wireless sensor networks*. Ad hoc networks, vol. 3, no. 3, pages 325–349, 2005.
- [Akyildiz et al. 2002] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramanian et Erdal Cayirci. *Wireless sensor networks : a survey*. Computer networks, vol. 38, no. 4, pages 393–422, 2002.
- [Al-Karaki & Kamal 2004] Jamal N Al-Karaki et Ahmed E Kamal. *Routing techniques in wireless sensor networks : a survey*. IEEE wireless communications, vol. 11, no. 6, pages 6–28, 2004.
- [Ali & Sai Kumar 2008] Mahmood Ali et Ravula Sai Kumar. *Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks*, 2008.
- [Alippi et al. 2007] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini et Manuel Roveri. *Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications*. In 2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, pages 1–6. IEEE, 2007.
- [Anastasi et al. 2009] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco et Andrea Passarella. *Energy conservation in wireless sensor networks : A survey*. Ad hoc networks, vol. 7, no. 3, pages 537–568, 2009.
- [Armstrong 2005] Trevor Armstrong. *Wake-up based power management in multi-hop wireless networks*. Term Survey Paper, University of Toronto, vol. 238, 2005.
- [Baccelli et al. 2009] E Baccelli, P Jacquet, D Nguyen et T Clausen. *OSPF multipoint relay (MPR) extension for ad hoc networks*. IETF Request for Comments, vol. 5449, 2009.
- [Badis & Agha 2003] Hakim Badis et Khaldoun Al Agha. *A distributed algorithm for multiple-metric link state QoS routing problem*. In Mobile And Wireless Communications Networks, pages 141–144. World Scientific, 2003.
- [Badis & Al Agha 2005] Hakim Badis et Khaldoun Al Agha. *QOLSR, QoS routing for ad hoc wireless networks using OLSR*. European Transactions on Telecommunications, vol. 16, no. 5, pages 427–442, 2005.

- [Barki *et al.* 2020] Omar Barki, Zouhair Guennoun et Adnane Addaim. *Improving the selection of MPRs in OLSR protocol : a survey of methods and techniques*. International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708), vol. 10, 2020.
- [Basagni *et al.* 1998] Stefano Basagni, Imrich Chlamtac, Violet R Syrotiuk et Barry A Woodward. *A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)*. In Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pages 76–84. ACM, 1998.
- [Beaubrun & Molo 2008] Ronald Beaubrun et Badji Molo. *Évaluation du délai dans un réseau mobile Ad hoc multi-services*. In 2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pages 000251–000256. IEEE, 2008.
- [Belkheir *et al.* 2015] Mohamed Belkheir, Zeyad Qasem, Merahi Bouziani et Abdelhalim Zerroug. *Ad Hoc Network Lifetime Enhancement by Energy Optimization*. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, vol. 28, no. 1-2, pages 83–95, 2015.
- [Belkheir 2015] Mohamed Belkheir. *QoS et conservation d'énergie dans les réseaux AD-HOC*. PhD thesis, UNIVERSITE DJILALI LIABES SBA, 2015.
- [Belkhira *et al.* 2019] Sid Ahmed Hichame Belkhira, Sofiane Boukli Hacene, Pascal Lorenz, Mohammed Belkheir, Marc Gilg et Merahi Bouziani. *WRE-OLSR, a new scheme for enhancing the lifetime within ad hoc and wireless sensor networks*. International Journal of Communication Systems, page e3975, 2019.
- [Belkhira *et al.* 2020] sid ahmed hichame Belkhira, sofiane Boukli Hacene, pascal Lorenz, Mohammed Belkheir, marc Gilg et Abdelhalim Zerroug. *A new mechanism for MPR selection in mobile ad hoc and sensor wireless networks*. In IEEE International Conference on Communications June 2020. IEEE, 2020.
- [Boukhalifa 2006] Leila Boukhalifa. *Prise en compte de la qualité de service dans les réseaux mobiles ad-hoc*. PhD thesis, Paris 12, 2006.
- [Boushaba 2007] Mustapha Boushaba. *Localisation des noeuds dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Montréal, 2007.
- [Brahma 2006] Mohamed Brahma. *Study of the QoS in the Ad hoc Networks : the Traffic Engineering Concept Integration*. PhD thesis, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2006.
- [Busson *et al.* 2005] Anthony Busson, Nathalie Mitton et Eric Fleury. *An analysis of the MPR selection in OLSR*. Spatial Stochastic Modeling of Wireless Networks, SpasWIN, vol. 5, 2005.
- [Camp *et al.* 2002] Tracy Camp, Jeff Boleng et Vanessa Davies. *A survey of mobility models for ad hoc network research*. Wireless communications and mobile computing, vol. 2, no. 5, pages 483–502, 2002.

- [Chaudet 2001a] Claude Chaudet. *Qualité de service et réseaux ad-hoc - un état de l'art*. MS3G 2001 Colloque sur les Services liés à la mobilité et Réseaux mobiles de 3ème génération, Décembre 2001.
- [Chaudet 2001b] Claude Chaudet. *Qualité de service et réseaux ad-hoc - un état de l'art*. Rapport technique RR-4325, INRIA, Novembre 2001. :inria-00072262 :inria-00072262 :inria-00072262 :inria-00072262
- [Chen & Gerla 1998] Tsu-Wei Chen et Mario Gerla. *Global state routing : A new routing scheme for ad-hoc wireless networks*. In ICC'98. 1998 IEEE International Conference on Communications. Conference Record. Affiliated with SUPERCOMM'98 (Cat. No. 98CH36220), volume 1, pages 171–175. IEEE, 1998.
- [chender 2006] Farid chender. *optimisation et balancement de la consommation d'énergie dans les reseaux adhoc mobiles et de capteurs*. PhD thesis, université de Montréal, 2006.
- [Chenxi et al. 2002] Zhang Chenxi, Lu Rongxing, Lin Xiaodong, Ho Pin-Han et Shen Xuemin. *An Efficient Identity-based Batch Verification Scheme for Vehicular Sensor Networks*. IEEE Communications Magazine, 2002.
- [Chiang et al. 1997] Ching-Chuan Chiang, Hsiao-Kuang Wu, Winston Liu et Mario Gerla. *Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel*. In proceedings of IEEE SICON, volume 97, pages 197–211, 1997.
- [Chvatal 1979] Vasek Chvatal. *A greedy heuristic for the set-covering problem*. Mathematics of operations research, vol. 4, no. 3, pages 233–235, 1979.
- [Cizeron 2009] Eddy Cizeron. *Routage multichemins et codage à transcription multiple dans les réseaux ad hoc*. PhD thesis, Université de Nantes, 2009.
- [Clausen et al. 2003] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Cédric Adjih, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Amir Qayyum et Laurent Viennot. *Optimized link state routing protocol (OLSR)*. Rapport technique, Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique (INRIA), 2003.
- [Corson & Macker 1999] S Corson et Joseph Macker. *RFC2501 : Mobile ad hoc networking (MANET) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations*, 1999.
- [Costa et al. 2002] Luis Henrique MK Costa, Serge Fdida et Otto Carlos MB Duarte. *Developing scalable protocols for three-metric QoS routing*. Computer Networks, vol. 39, no. 6, pages 713–727, 2002.
- [Crawley et al. 1998] Eric Crawley, Raj Nair, Bala Rajagopalan et Hal Sandick. *A Framework for QoS-based Routing in the Internet*. Rapport technique, IETF, 1998.

- [Diab *et al.* 2019] Tayeb Diab, Marc Gilg et Pascal Lorenz. *A secure communication model using lightweight Diffie-Hellman method in vehicular ad hoc networks*. International Journal of Security and Networks, vol. 14, no. 2, pages 61–77, 2019.
- [Ehrgott 2005] Matthias Ehrgott. Multicriteria optimization, volume 491. Springer Science & Business Media, 2005.
- [Espès 2008] David Espès. *Protocoles de routage réactifs pour l'optimisation de bande passante et la garantie de délai dans les réseaux ad hoc mobiles*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [Fabrice 2009] Lemainque Fabrice. Tout sur les réseaux sans fil, volume 1. DUNOD, 2009.
- [Fakihf *et al.* 2008] Khalil Fakihf, Juan Feng, Jean-Francois Diouris et Guillaume Andrieux. *MEDIUM ACCESS CONTROL FOR WIRELESS NETWORKS USING SMART ANTENNA*. Medium access control in wireless networks, page 177, 2008.
- [Fardin Far & Alaei 2018] Samira Fardin Far et Mohammad Alaei. *A New Method to Reduce Energy Consumption in Manet Network Routing based on OLSR Protocol and Genetic Algorithm*. journal of Advances in Computer Research, vol. 9, no. 3, pages 55–70, 2018.
- [Faucheur *et al.* 2002] F Le Faucheur, Liwen Wu, Bruce Davie, Shahram Davari, P Vaananen, Ram Krishnan, Pierrick Cheval et J Heinanen. *RFC3270 : Multi-Protocol Label Switching (MPLS) Support of Differentiated Services*, 2002.
- [Frikha 2010] Mounir Frikha. Réseaux ad hoc : routage, qualité de service et optimisation. Hermès Science, 2010.
- [Gangwar *et al.* 2012] Sanjeev Gangwar, Saurabh Pal et Krishan Kumar. *Mobile ad hoc networks : a comparative study of QoS routing protocols*. arXiv preprint arXiv :1201.5688, 2012.
- [Géron 2006] Aurélien Géron. Wifi, déploiement et sécurité : la qos et le wpa. Dunod, 2006.
- [Goyal *et al.* 2011] Priyanka Goyal, Vinti Parmar et Rahul Rishi. *Manet : vulnerabilities, challenges, attacks, application*. IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management, vol. 11, no. 2011, pages 32–37, 2011.
- [Guo & Yang 2007] Song Guo et Oliver Yang. *Localized operations for distributed minimum energy multicast algorithm in mobile ad hoc networks*. IEEE Transactions on parallel and distributed systems, vol. 18, no. 2, pages 186–198, 2007.
- [Gupta & Pradhan 2013] Arti Gupta et Manish Pradhan. *A Comparative Study of Current Routing Protocol in Wireless Ad-Hoc Network*. International Journal of Engineering Research and Technology, vol. 2, pages 144–148, 2013.

- [Haas & Pearlman 2001] Zygmunt J Haas et Marc R Pearlman. *The performance of query control schemes for the zone routing protocol*. IEEE/ACM Transactions on networking, vol. 9, no. 4, pages 427–438, 2001.
- [Hamze 2015] Mohamad Hamze. *Autonomie, sécurité et QoS de bout en bout dans un environnement de Cloud Computing*. Theses, Université de Bourgogne, Décembre 2015.
- [Hellman & Colagrosso 2006] Keith Hellman et Michael Colagrosso. *Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies*. Journal of Interconnection Networks, vol. 7, no. 01, pages 91–99, 2006.
- [Holland & Vaidya 1999] Gavin Holland et Nitin Vaidya. *Analysis of TCP Performance over Mobile Ad Hoc Networks—Part II : Simulation Details and Results*. Rapport technique, Texas A&M University, 1999.
- [Hurni & Braun 2009] Philipp Hurni et Torsten Braun. *Calibrating wireless sensor network simulation models with real-world experiments*. In International Conference on Research in Networking, pages 1–13. Springer, 2009.
- [Ingelrest & Simplot-Ryl 2006] François Ingelrest et David Simplot-Ryl. *Maximizing the probability of delivery of multipoint relay broadcast protocol in wireless ad hoc networks with a realistic physical layer*. In International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks, pages 143–154. Springer, 2006.
- [Ingelrest et al. 2007] François Ingelrest, David Simplot-Ryl et Ivan Stojmenović. *Smaller connected dominating sets in ad hoc and sensor networks based on coverage by two-hop neighbors*. In 2007 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware, pages 1–8. IEEE, 2007.
- [Jaddi 2006] Farid Jaddi. *CSR : une extension hiérarchique adaptative du protocole de routage ad hoc DSR*. PhD thesis, université de toulouse, 2006.
- [Jiang et al. 1998] M Jiang, J Li et YC Tay. *Cluster based routing protocol (CBRP) functional specification (Internet-Draft)*. Mobile Ad-hoc Network (MANET) Working Group, IETF, 1998.
- [Joa-Ng & Lu 1999] Mario Joa-Ng et I-Tai Lu. *A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks*. IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 17, no. 8, pages 1415–1425, 1999.
- [Johnson et al. 2001] David B Johnson, David A Maltz, Josh Brochet et al. *DSR : The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks*. Ad hoc networking, vol. 5, no. 1, pages 139–172, 2001.
- [Johnson et al. 2007] David Johnson, Yin-chun Hu, David Maltz et al. *The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4*. Rapport technique, RFC 4728, 2007.

- [Jun 2011] Ma Jun. *The study on multi-path DSDV in Ad Hoc*. In 2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, pages 299–303. IEEE, 2011.
- [Kacimi 2009] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, UNIVERSITÉ de toulouse, 2009.
- [Karl & Willig 2007] Holger Karl et Andreas Willig. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [Karp & Kung 2000] Brad Karp et Hsiang-Tsung Kung. *GPSR : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks*. In Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 243–254. ACM, 2000.
- [Khaloudoun Al Agha 2001] Guillaume Vivier Khaloudoun Al Agha Guy Pujolle. *Réseaux de mobiles et réseaux sans fil*, volume 3. EYROLLES, 2001.
- [Ko & Vaidya 2000] Young-Bae Ko et Nitin H Vaidya. *Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks*. *Wireless networks*, vol. 6, no. 4, pages 307–321, 2000.
- [Lakrami & Elkamoun 2012] Fatima Lakrami et Najib Elkamoun. *Mobility support in OLSR routing protocol*. In International Conference on Network Computing and Information Security, pages 804–812. Springer, 2012.
- [Lakrami et al. 2015] Fatima Lakrami, Najib Elkamoun et Mohamed El Kamili. *A survey on QoS for OLSR routing protocol in MANETs*. In International Symposium on Ubiquitous Networking, pages 287–300. Springer, 2015.
- [Le Grand 2001] Gwendal Le Grand. *Qualité de service dans des environnements Internet mobile*. PhD thesis, Paris 6, 2001.
- [Lee et al. 2000] Seoung-Bum Lee, Gahng-Seop Ahn, Xiaowei Zhang et Andrew T Campbell. *INSIGNIA : An IP-based quality of service framework for mobile ad hoc networks*. *Journal of Parallel and distributed Computing*, vol. 60, no. 4, pages 374–406, 2000.
- [Lohier et al. 2002] Stéphane Lohier, Sidi-Mohamed Senouci, Yacine Ghamri Doudane et Guy Pujolle. *QoS routing in ad hoc networks*, 2002.
- [Maheswara & Naik 2013] P Venkata Maheswara et K Bhaskar Naik. *Routing protocol performance issues and evaluation considerations in MANET*. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN*, vol. 2248, 2013.
- [Mahfoudh & Minet 2007] Saoucene Mahfoudh et Pascale Minet. *A comparative study of energy efficient routing strategies based on OLSR*. Rapport technique, Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique (INRIA), 2007.

- [Mans *et al.* 2004] Bernard Mans, Nirisha Shrestha *et al.* *Performance evaluation of approximation algorithms for multipoint relay selection*. In Proceedings of the 3rd Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, pages 480–491, 2004.
- [Martins 1984] Ernesto Queiros Vieira Martins. *On a multicriteria shortest path problem*. European Journal of Operational Research, vol. 16, no. 2, pages 236–245, 1984.
- [Meraihi *et al.* 2003] Rabah Meraihi, Gwendal Le Grand, Samir Tohmé *et* Michel Riguidel. *Real time application support in an ambient network using intelligent mobile robots*. In European Symposium on Ambient Intelligence, pages 88–98. Springer, 2003.
- [Meraihi 2010] Rabah Meraihi. *Quality of service support and topology control in mobile ad hoc networks*. PhD thesis, Ecole nationale supérieure des télécommunications paris, 2010.
- [Mirhakkak *et al.* 2000] Mohammad Mirhakkak, Nancy Schult *et* D Thomson. *Dynamic quality-of-service for mobile ad hoc networks*. In 2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing. MobiHOC (Cat. No. 00EX444), pages 137–138. IEEE, 2000.
- [Mohapatra & Krishnamurthy 2004] Prasant Mohapatra *et* Srikanth Krishnamurthy. *Ad hoc networks : technologies and protocols*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [Mounir 2010] FRIKHA Mounir. *routage, qualité de service et optimisation*, volume 1. LAVOISIER, 2010.
- [Murray *et al.* 2010] David Murray, Michael Dixon *et* Terry Koziniec. *An experimental comparison of routing protocols in multi hop ad hoc networks*. In 2010 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, pages 159–164. IEEE, 2010.
- [Naimi 2015] Sabrina Naimi. *Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage*. PhD thesis, UNIVERSITÉ PARIS-SUD, 2015.
- [Ngom 2016] Diery Ngom. *Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau*. PhD thesis, Université de Haute Alsace, 2016.
- [Nguyen & Minet 2006] Dang-Quan Nguyen *et* Pascale Minet. *QoS support and OLSR routing in a mobile ad hoc network*. In International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies (ICNICONSMCL'06), pages 74–74. IEEE, 2006.
- [Nguyen & Minet 2007] Dang-Quan Nguyen *et* Pascale Minet. *Quality of Service Routing in a MANET with OLSR*. J. UCS, vol. 13, no. 1, pages 56–86, 2007.

- [Ouakil 2002] Laurent Ouakil. *Rapport de stage : Routage dans les réseaux ad hoc minimisant la consommation des batteries*. Rapport technique, Université Pierre et Marie Curie Paris6, 2002.
- [Oudidi 2010] Kamal Oudidi. *Routage et Qualité de Service dans les réseaux sans fil spontanés*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes, (ENSIAS)- RABAT, 2010.
- [Park & Corson 1997] Vincent Douglas Park et M Scott Corson. *A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks*. In Proceedings of INFOCOM'97, volume 3, pages 1405–1413. IEEE, 1997.
- [Pei et al. 2000] Guangyu Pei, Mario Gerla et Tsu-Wei Chen. *Fisheye state routing : A routing scheme for ad hoc wireless networks*. In 2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record, volume 1, pages 70–74. IEEE, 2000.
- [Perkins & Bhagwat 1994] Charles E Perkins et Pravin Bhagwat. *Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers*. In ACM SIGCOMM computer communication review, volume 4-24, pages 234–244. ACM, 1994.
- [Perkins & Royer 1999] Charles E Perkins et Elizabeth M Royer. *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. In Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pages 90–100. IEEE, 1999.
- [Polastre et al. 2004] Joseph Polastre, Jason Hill et David Culler. *Versatile low power media access for wireless sensor networks*. In Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pages 95–107, 2004.
- [Pottie & Kaiser 2000] Gregory J Pottie et William J Kaiser. *Wireless integrated network sensors*. Communications of the ACM, vol. 43, no. 5, pages 51–58, 2000.
- [Pujolle 2014] Guy Pujolle. *Les réseaux*. Editions Eyrolles, 2014.
- [Purnama & Purnomo 2018] E. Setijadi Purnama I. K. E. et M. H. Purnomo. *Minmax Algorithm for MPR Selection in Improving the Performance of OLSR Protocol on MANET*. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). IEEE, pages 136–140, 2018.
- [Qayyum et al. 2000] Amir Qayyum, Laurent Viennot et Anis Laouiti. *Multipoint relaying : An efficient technique for flooding in mobile wireless networks*. Rapport technique, Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique (INRIA), 2000.
- [Qayyum et al. 2002] Amir Qayyum, Laurent Viennot et Anis Laouiti. *Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks*. In Proceedings of the 35th annual Hawaii international conference on system sciences, pages 3866–3875. IEEE, 2002.

- [Raghunathan *et al.* 2002] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park et Mani B Srivastava. *Energy-aware wireless microsensor networks*. IEEE Signal processing magazine, vol. 19, no. 2, pages 40–50, 2002.
- [Rajendran *et al.* 2003] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka et Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. *Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks*. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pages 181–192, 2003.
- [Rhee *et al.* 2008] Injong Rhee, Ajit Warriar, Mahesh Aia, Jeongki Min et Mihail L Sichitiu. *Z-MAC : a hybrid MAC for wireless sensor networks*. IEEE/ACM Transactions On Networking, vol. 16, no. 3, pages 511–524, 2008.
- [Rodoplu & Meng 1999] Volkan Rodoplu et Teresa H Meng. *Minimum energy mobile wireless networks*. IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 17, no. 8, pages 1333–1344, 1999.
- [Ros 2006] Francisco J Ros. *um-olsr-1.0. tgz*. University of Murcia, Spain, available online at <http://masimum.inf.um.es/fjrm/development/um-olsr/and> <http://sourceforge.net/projects/um-olsr>, 2006.
- [Royer & Perkins 1999] Elizabeth M Royer et Charles E Perkins. *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. In Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, volume 2, pages 90–100, 1999.
- [Saddiki *et al.* 2017] Kamel Saddiki, Sofiane Boukli-Hacene, Pascal Lorenz et Marc Gilg. *Black hole attack detection and ignoring in OLSR protocol*. International Journal of Trust Management in Computing and Communications, vol. 4, no. 1, pages 75–93, 2017.
- [Saddiki 2019] Kamel Saddiki. *Denial of services attack in wireless networks*. PhD thesis, University Djillali liabes of Sidi Bel Abbes, 2019.
- [Said *et al.* 2011] Samir M Said, Ibrahiem MM El Emary et Shatha Kadim. *Comparative study between the performance of proactive and reactive mobile ad-hoc networks (MANET) routing protocols with varying mobility*. Scientific Research and Essays, vol. 6, no. 6, pages 1256–1274, 2011.
- [Sailhan 2005] Françoise Sailhan. *Localisation de ressources dans les réseaux ad hoc*. PhD thesis, université PARIS VI, 2005.
- [Sarkar *et al.* 2008] SK Sarkar, TG Basavaraju et C Puttamadappa. *Routing protocols for ad hoc wireless networks*. Ad Hoc Mobile Wireless Networks : Principles, Protocols, and Applications, pages 59–112, 2008.
- [Schurgers & Srivastava 2001] Curt Schurgers et Mani B Srivastava. *Energy efficient routing in wireless sensor networks*. In 2001 MIL-COM Proceedings Communications for Network-Centric Operations : Creating the Information Force (Cat. No. 01CH37277), volume 1, pages 357–361. IEEE, 2001.

- [Schurgers *et al.* 2002] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis et Mani B Srivastava. *STEM : Topology management for energy efficient sensor networks*. In Proceedings, IEEE Aerospace Conference, volume 3, pages 3–3. IEEE, 2002.
- [SEBAHI 2013] Yazid SEBAHI. Routage avec qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2013.
- [Senouci & Guy 2002] Sidi-Mohammed Senouci et Pujolle Guy. *A Survey of Sensor Network Applications*. IEEE Communications Magazine, 2002.
- [Sesay *et al.* 2004] Samba Sesay, Zongkai Yang et Jianhua He. *A survey on mobile ad hoc wireless network*. Information Technology Journal, vol. 3, no. 2, pages 168–175, 2004.
- [Shah & Rabaey 2002] Rahul C Shah et Jan M Rabaey. *Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks*. In 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No. 02TH8609), volume 1, pages 350–355. IEEE, 2002.
- [Singh & Singh 2002] Harkirat Singh et Suresh Singh. *Energy Consumption of TCP Reno, Newreno, and SACK in Multi-hop Wireless Networks*. In Proceedings of the 2002 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, SIGMETRICS '02, pages 206–216, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [Sivakumar *et al.* 1999] Raghupathy Sivakumar, Prasun Sinha et Vaduvur Bharghavan. *CEDAR : a core-extraction distributed ad hoc routing algorithm*. IEEE Journal on Selected Areas in communications, vol. 17, no. 8, pages 1454–1465, 1999.
- [Sondi Obwang 2010a] Patrick Sondi Obwang. *Le routage à qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc*. PhD thesis, Valenciennes, 2010.
- [Sondi-Obwang 2010b] Patrick Sondi-Obwang. *Le Routage à Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc*. PhD thesis, Université de Valenciennes, 2010.
- [Soro & Heinzelman 2005] Stanislava Soro et Wendi B Heinzelman. *Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering*. In 19th IEEE international parallel and distributed processing symposium, pages 8–pp. IEEE, 2005.
- [Sra & Chand 2019] Pushp Sra et Satish Chand. *QoS in Mobile Ad-Hoc Networks*. Wireless Personal Communications, vol. 105, no. 4, pages 1599–1616, 2019.
- [Stojmenovic *et al.* 2002] Ivan Stojmenovic, Mahtab Seddigh et Jovisa Zunic. *Dominating sets and neighbor elimination-based broadcasting algorithms in wireless networks*. IEEE Transactions on parallel and distributed systems, vol. 13, no. 1, pages 14–25, 2002.

- [Theoleyre 2006] Fabrice Theoleyre. *Une auto-organisation et ses applications pour les réseaux ad hoc et hybrides*. Lion, 2006.
- [Tian & Georganas 2002] Di Tian et Nicolas D Georganas. *A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks*. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, pages 32–41. ACM, 2002.
- [Tsaoussidis *et al.* 1999] Vassilios Tsaoussidis, Hussein Badr et Rohit Verma. *Wave & wait protocol (WWP) : an energy-saving transport protocol for mobile IP-devices*. In Proceedings. Seventh International Conference on Network Protocols, pages 301–308. IEEE, 1999.
- [Tsaoussidis *et al.* 2000] Vassilios Tsaoussidis, Hussein Badr, Xin Ge et Kostas Pentikousis. *Energy/throughput tradeoffs of TCP error control strategies*. In Proceedings ISCC 2000. Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications, pages 106–112. IEEE, 2000.
- [Usop *et al.* 2009] Nor Surayati Mohamad Usop, Azizol Abdullah, Ahmad Faisal Amri Abidinet *al.* *Performance evaluation of AODV, DSDV & DSR routing protocol in grid environment*. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 9, no. 7, pages 261–268, 2009.
- [Van Den Bossche 2007] Adrien Van Den Bossche. *Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles*. PhD thesis, université de toulouse II, 2007.
- [Vijay *et al.* 2009] Sandip Vijay, SC Sharma, Santosh Kumaret *al.* *Research Reviews of IEEE 802.11 Wireless Ad-hoc Networks*. International Journal of Recent Trends in Engineering, vol. 1, no. 2, page 233, 2009.
- [Xiao *et al.* 2000] Hannan Xiao, Winston KG Seah, Anthony Lo et Kee Chaing Chua. *A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks*. In VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37026), volume 1, pages 445–449. IEEE, 2000.
- [Xiao *et al.* 2002] Li Xiao, Jun Wang et M Nahrstedt. *The enhanced ticket-based routing algorithm*. In 2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333), volume 4, pages 2222–2226. IEEE, 2002.
- [Xu *et al.* 2001] Ya Xu, John Heidemann et Deborah Estrin. *Geography-informed energy conservation for ad hoc routing*. In Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 70–84, 2001.
- [Yang *et al.* 2011] Xiao Yang, Chen Hui et Li Frank Haizhon. *Handbook of security and networks*. World Scientific, 2011.
- [Ye *et al.* 2004] Wei Ye, John Heidemann et Deborah Estrin. *Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks*.

IEEE/ACM Transactions on networking, vol. 12, no. 3, pages 493–506, 2004.

- [Younis *et al.* 2002] Mohamed Younis, Moustafa Youssef et Khaled Ari-sha. *Energy-aware routing in cluster-based sensor networks*. In Proceedings. 10th IEEE international symposium on modeling, analysis and simulation of computer and telecommunications systems, pages 129–136. IEEE, 2002.
- [Yousef 2010] Yaser Yousef. *Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Mulhouse, 2010.
- [Yu *et al.* 2001] Yan Yu, Ramesh Govindan et Deborah Estrin. *Geographical and energy aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks*. Rapport technique, UCLA , Computer Science Department, 2001.
- [Zheng *et al.* 2003] Rong Zheng, Jennifer C Hou et Lui Sha. *Asynchronous wakeup for ad hoc networks*. In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, pages 35–45, 2003.

NOTATIONS

OLSR	Optimized Link State Protocol
MPR	MultiPoint Rely
TC	Topology Control
DSDV	Destination Sequence Distance Vector
TBRPF	Topology Dessimination based on Revers Path Forwarding
RREQ	Route Requeste
RREP	Route Reply
CBR	Constant Bit Rate
MANET	Mobil Ad Hoc Network
AODV	Ad-hoc On Demande Distance Vector
IEEE	Institue of Electricol and Electronicol Engenies
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Networks
Wi-Fi	Wireless Fidelity
ZRP	Zone Routing Protocol
QoS	Quality Of Service
DSR	Dynamic Source Routing
CBRP	Cluster Based Routing
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
UDP	User Datagram Protocol
TTL	Time To Live
GSM	Groupe Spécial Mobile

PDR	packet delivery ratio
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data GSM Environment
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
MAC	Medium Access Control
NS	Networks Simulator
TCL	Tcl Command Language
TK	Tool kit
OTCL	Object Tool Command Language
CH	Cluster Head
VANET	Vehicular Ad hoc NETWORK

المخلص

ان التطور التقني الذي نشهده اليوم مدعوما بخاصية تنقل المستخدمين و التطور المستمر للأجهزة المتنقلة (الهواتف الذكية, الحواسيب اللوحية, الحساسات, ...) أدى الى ظهور أنواع جديدة من الشبكات مثل شبكات الحساسات النقالة وتعددت استخداماتها في المجال العسكري ومجال مراقبة الظواهر الطبيعية, العديد من القيود تلف انشاء واستخدام هذه الشبكات نظرا للقدرات المحدودة للأجهزة و الحساسات التي تكون هذه الشبكات فيما يخص قدرة المعالجة و قدرة التخزين وخاصة القدرة الطاقوية المحدودة نظرا لاستخدام البطاريات. خاصية أخرى يجب اخذها بعين الاعتبار عند تصميم وإنجاز هذا النوع من الشبكات هو نوعية الخدمة. بحثنا يركز خصيصا على تطوير طرق جديدة للتوجيه (بروتوكولات) لغرض اقتصاد الطاقة على مستوى الطبقة الثالثة من نموذج OSI بالاعتماد على بروتكول التوجيه OLSR والمستخدم بكثرة في مجال الشبكات الاسلكية المتنقلة و شبكات الحساسات يستخدم هذا البرتكول تقنية النقاط المتعددة MPR وهي تقنية تهدف الى تخفيض رسائل المراقبة خلال عملية اكتشاف الشبكة عملنا يتمثل في تعديل طريقة اختيار نقاط MPR بإدخال مستوى الطاقة كشرط أساسي لاختيار هذه المجموعة ما يمكن من رفع الضغط عن العقد التي تختار باستمرار و يمكن من إطالة مدة عملها ومن خلال ذلك عمر الشبكة الشيء الذي له تأثير ايجابي على المعايير الأخرى لنوعية الخدمة

كلمات مفتاحية :

الشبكات لاسلكية متنقلة, شبكة حساسات لاسلكية, نوعية الخدمة, مدة حياة الشبكة, الطاقة

Résumé

Les progrès technologiques réalisés ces dernières années, soutenus par la mobilité des utilisateurs et le développement continu des unités mobiles (Smartphones, PDA, tablettes, capteurs, ...), ont vu la naissance de nouveaux types réseaux comme les réseaux adhoc mobiles et les AHWSN (Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks) dont les domaines d'applications sont nombreux : domotique, santé, domaine militaire ou bien encore surveillance de phénomènes environnementaux. Des contraintes de déploiement de ces réseaux sont imposées à savoir : la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie. Une autre contrainte prépondérante à qui on doit faire face et qui introduit d'autres métriques à tenir en compte lors du déploiement de tels réseaux est la qualité de service QoS, si nous envisageons une extension voir un remplacement des réseaux filaires par ces nouvelle génération de réseaux.

Notre travail a été principalement axé sur l'étude et l'introduction de nouveaux mécanismes de routage en vue d'optimiser la consommation d'énergie au niveau de la couche réseau, en se basant sur le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) très répandu dans le domaine des réseaux adhoc mobile et les réseaux AHWSN en modifiant l'heuristique de sélection des MPRs, en introduisant l'énergie résiduelle comme critère essentiel de calcul de ces derniers

Mots Clés :

réseaux Adhoc, AHWSN, Qualité de service, OLSR, MANET, Durée de vie, Energie

Abstract

Technological progress performed these last years, supported by the mobility of the users and the continuous development of mobile units (Smartphones, PDA, tablets, sensors), shown the birth of a new category of networks as Adhoc networks and AHWSN (Ad hoc and Sensor Wireless Networks). They can be implemented in various application domains such as: home automations, health care services, military domain and monitoring environments. The deployment of such networks is conditioned by a multiple constraints: Limitation of nodes processing capabilities, storage, and energy constraints. Another crucial constraint to take into account is the Quality of Service QoS, which adds several metrics for deploying such networks, if we want that AHWSN goal is to replace existent wired networks.

The aim of our work is to study and develop new routing mechanisms in order to improve energy management within the third level of OSI model, based on OLSR by the modification of the MPR selection mechanism, with the introduction of the node residual energy as an essential criterion on the MPR set calculation.

Keywords:

AHWSN, quality of service, OLSR, MANET, lifetime, Energy