

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli
Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي
معسكر

Faculté des sciences exactes
Département de l'informatique

كلية العلوم الدقيقة
قسم الاعلام الالي

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Technologie de l'information et de la communication

Intitulée

Routage stable pour les réseaux sans fil mobiles dans les milieux urbains

Présentée par : BENATIA Salah Eddine

Le 13/07/2022

Devant le jury :

Présidente	BOUFERA Fatma	MCA	Université de Mascara
Examinatrice	DEBBAT Fatima	Prof	Université de Mascara
Examineur	KECHAR Bouabdallah	Prof	Université d'Oran 1
Encadreur	SMAIL Omar	MCA	Université de Mascara
Co-encadreur	MEFTAH Boudjelal	Prof	Université de Mascara

Année Universitaire : 2021-2022

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

Mes très chers parents pour leurs dévouements et leurs encouragements. Que ce travail soit un témoignage de ma profonde gratitude envers eux.

Mon frère Sid Ahmed et mes sœurs Nassiba, Hafidha et Bouchra.

Mes chers oncles Abou bakr & Mohammed.

A tous les membres de la famille Benatia et Cherifi.

Remerciements

Avant tout, je remercie infiniment ALLAH le tout-puissant, qui m'a donné la force et la volonté pour accomplir cette modeste thèse et pour ses aides durant toute ma vie.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et toute ma reconnaissance à mon directeur thèse Mr. Smail Omar pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce sujet, la confiance faite ainsi que ses précieux conseils, sa disponibilité et son temps consacré durant ces années de thèse. Ce travail n'aurait pas abouti sans son soutien, son suivi pédagogique et ses généreuses orientations.

Je remercie vivement mon co-encadreur Mr. Meftah Boudjelal et Mr. Bernard Cousin pour leurs aides scientifiques, leurs remarques constructives et leur implication dans mes travaux publiés.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres de jury d'avoir accepté de faire partie du jury de soutenance.

J'adresse mes vifs remerciements à Mme. BOUFERA Fatma qui nous fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. J'exprime ensuite ma plus profonde gratitude à Mme. DEBBAT Fatima et Mr. KECHAR Bouabdallah qui ont acceptés de participer au jury, dont les connaissances suscitent énormément de respect.

Je tiens également à remercier tous mes professeurs de l'université de Mascara, qui m'ont beaucoup appris tout au long de mon cursus universitaire.

Enfin, un merci particulier à mes amis, mes collègues et à tout ce qui m'ont soutenu de près ou de loin, merci à vous tous.

Résumé

Les réseaux sans fil rendent la communication plus simple et facile à accéder à tout moment et indépendamment de l'emplacement géographique qui n'est plus statique comme le cas du réseau filaire. Le réseau ad hoc est un réseau mobile sans fil et sans infrastructure, appelé MANET (Mobile ad hoc network) ; Il se compose d'un ensemble de nœuds mobiles et autonomes formant une topologie dynamique. Les nœuds coopèrent pour gérer les communications.

Le routage dans un tel réseau est un défi majeur à cause de ses caractéristiques (la mobilité, l'énergie limitée, etc.). Les protocoles de routage utilisent des métriques (nombre de sauts, énergie...) pour choisir le meilleur chemin. Un autre concept est le routage multi chemins permettant de trouver plusieurs chemins qui peuvent être utilisés simultanément. De plus, la particularité du milieu urbain représente un autre challenge qui comporte des restrictions affectant la mobilité et la qualité du signal. Par conséquent, il est nécessaire de sélectionner un chemin stable afin d'assurer une communication fiable.

Nous nous intéressons à la problématique du routage dans un milieu urbain. Dans cette thèse, nous avons étudié les protocoles de routages basés sur la contrainte d'énergie et la stabilité. Ensuite, nous avons proposé un protocole de routage multi chemins ESMRsc (Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol in Smart City) qui se base sur la contrainte d'énergie et de la stabilité. Le but est d'évaluer la stabilité (en fonction de la mobilité) et la capacité énergétique des chemins trouvés et de choisir le meilleur chemin selon une combinaison des deux contraintes. Nous avons proposé ensuite une extension de notre première proposition, ESMRua (Efficient energy aware and Link Stable Multipath Routing Protocol in urban areas). ESMRua utilise trois variantes pour calculer la stabilité. Le but est de choisir le chemin le plus stable avec une énergie suffisante pour augmenter la durée de vie du chemin et réduire le nombre de coupures dans les milieux urbains.

Enfin, nous avons proposé un nouveau protocole de routage nommé RMSQ-ua (Reliable Multipath Routing Protocol based on Link Quality and Stability in Urban Areas) qui prend en compte deux contraintes: la stabilité et la qualité des liens. RMSQ-ua utilise un nouvel estimateur de la qualité des liens qui combine deux métriques de qualité: SNR (Signal Noise Ratio) et PRR (Packet Reception Ratio) afin d'améliorer la précision de l'estimation de la qualité des liens.

La performance de nos protocoles a été évaluée en utilisant trois différents modèles de mobilité : Random Way Point, Manhattan Grid et SMOOTH. L'évaluation de nos protocoles a montré des résultats très satisfaisants en termes de taux de livraison, de consommation d'énergie et d'overhead.

Mots clés : Réseau mobile ad hoc, Protocole de routage, Routage multi chemins, Energie, Stabilité, Qualité des liens, Milieu urbain.

Abstract

The wireless networks make communication simpler and easier to access at any time and regardless of geographical location contrary to the wired network where the location is static. The ad hoc network is a mobile wireless network without infrastructure, called MANET (Mobile ad hoc network); it consists of a set of mobile nodes that create a dynamic topology. Nodes cooperate to manage communications.

Routing in such a network is a major challenge because of its characteristics (mobility, limited energy, etc.). The routing protocols use metrics (such as the number of hops, energy, etc.) to choose the best path. Another concept is multipath routing which is able to find multiple paths that can be used simultaneously. In addition, the particularity of the urban environment represents another challenge which includes restrictions affecting mobility and signal quality. Therefore, it is necessary to select a stable path in order to ensure reliable communication.

We focused on the problem of routing in an urban environment. In this thesis, we studied routing protocols based on energy constraint and stability. Then, we proposed a multipath routing protocol ESMRsc (Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol in Smart City) which is based on the constraint of energy and stability. The goal is to evaluate the stability (according to the mobility) and the energy capacity of the paths and then choose the best path according to a combination of the two constraints. We then proposed an extension of our first proposal, ESMRua (Efficient energy aware and Link Stable Multipath Routing Protocol in urban areas). ESMRua uses three variants to calculate stability. The objective is to choose the most stable path with sufficient energy to increase the life of the path and reduce the number of link failures in urban environments.

Finally, we have proposed a new routing protocol named RMSQ-ua (Reliable Multipath Routing Protocol based on Link Quality and Stability in Urban Areas) which takes into account two constraints: link stability and link quality. RMSQ-ua uses a new link quality estimator that combines two quality metrics: SNR (Signal Noise Ratio) and PRR (Packet Reception Ratio) to improve the accuracy of link quality estimation.

The performance of our protocols was evaluated using three different mobility models: Random Way Point, Manhattan Grid and SMOOTH. The evaluation of our protocols showed interesting results in terms of delivery rate, energy consumption and overhead.

Keywords: Mobile ad hoc network, Routing protocol, Multi-path routing, Energy, Stability, Link quality, Urban area.

الخلاصة

جعلت الشبكات اللاسلكية الاتصال أبسط وأكثر سلاسة مع إمكانية الوصول للشبكة في أي وقت و بغض النظر عن الموقع الذي لم يعد ثابتاً مثلما كان عليه الحال مع الشبكة السلكية. الشبكة المخصصة هي شبكة لاسلكية متنقلة بدون بنية تحتية ، تسمى (MANET) و هي شبكة مخصصة متنقلة) ؛ يتكون من مجموعة من النقاط المتنقلة والمستقلة و التي تشكل طوبولوجيا ديناميكية. تتعاون النقاط فيما بينها لإدارة الاتصالات.

يعد التوجيه في مثل هذه الشبكة تحديًا كبيرًا بسبب خصائصها الفريدة (التنقل ، والطاقة المحدودة ، وما إلى ذلك). تستخدم بروتوكولات التوجيه مقاييس (عدد الخطوات والطاقة وما إلى ذلك) لاختيار أفضل مسار. مفهوم آخر هو التوجيه متعدد المسارات و الذي يمكننا من ايجاد مسارات متعددة يمكن استخدامها في وقت واحد. بالإضافة إلى ذلك ، تمثل خصوصية البيئة الحضرية تحديًا آخر يشمل القيود التي تؤثر على التنقل وجودة الإشارة. لذلك ، من الضروري تحديد مسار يضمن الثبات للحصول على اتصال موثوق.

ركزنا بشكل أكبر على مشكلة التوجيه في البيئة الحضرية. في هذه الأطروحة ، درسنا بروتوكولات التوجيه القائمة على الطاقة ومدى استقرارها. بعد ذلك ، اقترحنا بروتوكول توجيه متعدد المسارات ESMRsc والذي يعتمد على خاصتي الطاقة والاستقرار. الهدف هو تقييم الاستقرار (بدلالة مدى التحرك) وقدرة الطاقة للمسارات الموجودة واختيار أفضل مسار بينهم. ثم اقترحنا تمديدًا للبروتوكول السابق و يحمل اسم ESMRua و الذي يستخدم ثلاثة متغيرات لحساب مدى الاستقرار. الهدف هو اختيار المسار الأكثر استقرارًا مع طاقة كافية لزيادة عمر المسار وتقليل عدد الانقطاعات في البيئات الحضرية

أخيرًا ، اقترحنا بروتوكول توجيه جديدًا يسمى RMSQ-ua والذي يأخذ في الاعتبار مقياسين : الاستقرار وجودة المسار يستخدم RMSQ-ua مقدر جودة جديدًا يجمع بين مقياسين للجودة و هما : SNR (نسبة ضوضاء الإشارة) و PRR(نسبة استقبال البيانات) لتحسين دقة تقدير جودة المسار.

قمنا بتقييم أداء البروتوكولات المقترحة باستخدام ثلاثة نماذج مختلفة للتنقل : Random Way Point و Manhattan Grid و SMOOTH. أظهر تقييم بروتوكولاتنا نتائج مرضية للغاية من حيث معدل استلام البيانات واستهلاك الطاقة و التكلفة الإضافية.

الكلمات الرئيسية: شبكة مخصصة ، بروتوكول التوجيه ، التوجيه متعدد المسارات ، الطاقة ، الثبات ، جودة المسار ، منطقة حضرية.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	vi
Tables des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xii
Chapitre I. Introduction générale	
I.1. Introduction	1
I.2. Définition d'un réseau sans fil	2
I.3. Définition d'un réseau ad hoc	3
I.4. Caractéristique du réseau ad hoc	3
I.5. Avantages et limites	4
I.6. Domaines d'application.....	5
I.7. Problématique du réseau ad hoc.....	5
I.8. Contribution et Plan de la thèse.....	7
Chapitre II. Routage dans les réseaux ad hoc	
II.1. Classification des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc.....	10
II.1.1. Protocole proactif.....	11
II.1.1.1. Le protocole DSDV.....	12
II.1.1.2. Le protocole OLSR.....	13
II.1.2. Protocole réactif	15
II.1.2.1. Le protocole DSR.....	16
II.1.2.2. Le protocole AODV.....	17
II.1.3. Protocole hybride	19
II.1.3.1. Le protocole ZRP.....	19
II.1.4. Basé sur la structure du réseau.....	21
II.1.4.1. Protocole plat.....	21
II.1.4.2. Protocole hiérarchique.....	21
II.2. Routage multi chemins.....	23
II.2.1. Concept de routage multi chemins.....	24
II.2.2. Type des chemins multiples.....	25
II.2.3. Protocoles de routages multi chemins.....	26

II.2.3.1. Le protocole AOMDV.....	26
II.2.3.2. Le protocole MP-OLSR.....	29
II.2.3.3. Le protocole MSR.....	31
II.3. Conclusion.....	32
Chapitre III. Routage avec contrainte d'énergie et de stabilité	
III.1. Introduction	33
III.2. La consommation de l'énergie dans un réseau ad hoc	33
III.2.1. Mode d'opération dans un réseau ad hoc	34
III.2.2. Sources de perte d'énergie	35
III.2.3. La durée de vie	36
III.3. Approches de conservation d'énergie dans un réseau ad hoc	36
III.3.1. Routage avec conservation d'énergie.....	37
III.3.1.1.La puissance de transmission	37
III.3.1.2.L'énergie restante.....	38
III.3.1.3.Durée de vie.....	39
III.3.1.4.Métriques combinées.....	40
III.3.2. Contrôle la puissance de transmission	40
III.3.3. Mode inactif	41
III.3.4. Partage de la charge.....	42
III.4. Routage avec contrainte de stabilité	43
III.4.1. La Notion de stabilité	43
III.4.2. Classification de la stabilité des liens.....	43
III.4.2.1.Stabilité basée sur la distance	43
III.4.2.2.Stabilité basée sur la mobilité.....	45
III.4.3. Les modèles de mobilité.....	46
III.4.3.1.Modèle de mobilité aléatoire	46
III.4.3.2.Modèle de mobilité avec dépendance temporelle	47
III.4.3.3.Modèle de mobilité avec dépendance spatiale	47
III.4.3.4.Modèle de mobilité avec restriction géographique	48
III.4.3.5.Modèle de mobilité humaine.....	48
III.5. Routage avec contrainte d'énergie et la stabilité.	49
III.6. Conclusion	50
Chapitre IV. Protocole de routage multi chemins: ESMRsc et ESMRua	

IV.1.	Le protocole de routage ESMRsc	52
IV.1.1.	Le processus de découverte du chemin	53
IV.1.2.	Le processus de sélection des chemins	54
IV.1.2.1.	La fonction d'énergie.....	55
IV.1.2.2.	La fonction de stabilité.....	56
IV.1.2.3.	La fonction objective.....	57
IV.1.3.	Evaluation des performances du protocole ESMRsc	57
IV.1.3.1.	Environnement et paramètres de simulation	58
IV.1.3.2.	L'énergie consommée.....	59
IV.1.3.3.	Le nombre de paquet reçue	59
IV.1.4.	Discussion	60
IV.2.	Le protocole ESMRua	60
IV.2.1.	La fonction de la stabilité	61
IV.2.1.1.	Calcul basé sur l'écart type standard	61
IV.2.1.2.	Calcul basé sur l'écart absolu moyen	61
IV.2.1.3.	Calcul basé sur l'écart type exponentiel	62
IV.2.2.	La fonction objective.....	62
IV.2.3.	Evaluation des performances du protocole ESMRua.....	62
IV.2.3.1.	Environnement et paramètres de simulation	63
IV.2.3.2.	L'énergie consommée (basée sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)	64
IV.2.3.3.	PDR (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)	64
IV.2.3.4.	Overhead (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)	65
IV.2.3.5.	L'énergie consommée et le PDR (basés sur le modèle de mobilité RWP)	66
IV.3.	Conclusion	67

Chapitre V. Routage dans les réseaux urbains

V.1.	Introduction	68
V.2.	Notion de transmission radio.....	68
V.2.1.	Phénomènes de propagation radio	69
V.2.2.	Causes de dégradation du signal	69
V.3.	Qualité du signal sans fil	70
V.3.1.	Estimateur de qualité de signal (LQE).....	71
V.3.1.1.	Définition d'un LQE.....	71
V.3.1.2.	Que doit assurer un LQE.....	71

V.3.1.3. Processus de calcul LQE.....	72
V.4. Classification des estimateurs de qualité du lien.....	72
V.4.1. Métriques LQE physiques.....	73
V.4.1.1. Définitions.....	73
V.4.1.2. Discussion.....	73
V.4.1.3. Protocoles de routage basé sur les métriques LQE physiques	74
V.4.2. Métriques LQE logiques	75
V.4.2.1. PRR-based.....	75
V.4.2.2. RNP-based.....	75
V.4.2.3. Score-based.....	75
V.4.2.4. Discussion.....	76
V.4.2.5. Protocoles de routage basé sur les métriques LQE logiques.....	76
V.4.3. Etude comparative des métriques de la qualité du lien.....	79
V.5. Protocoles de routage multi objectifs avec prise en compte de la qualité.....	80
V.6. Conclusion.....	82
Chapitre VI. Protocole de routage mutli chemins RMSQ-ua	
VI.1. Le protocole RMQS-ua	83
VI.1.1. Justification du choix des métriques de la qualité.....	84
VI.1.2. Définition du problème	85
VI.1.3. La conception du protocole RMQS-ua.....	86
VI.1.3.1. Processus de découverte du protocole RMQS-ua	86
VI.1.3.2. Processus de sélection et évaluation des chemins.....	89
VI.1.3.3. Processus de maintenance des chemins	92
VI.1.4. Exemple de fonctionnement du protocole RMQS-ua	93
VI.1.5. Evaluation des performances du protocole RMQS-ua.....	94
VI.1.5.1. Les paramètres de performances :.....	94
VI.1.5.2. Environnement de simulation.....	94
VI.1.5.3. Evaluation des performances	95
VI.2. Conclusion	101
Chapitre VII. Conclusion et perspectives	
VII.1. Conclusion	103
VII.2. Perspectives	106

Table des figures

Figure 1. Mode de communication	2
Figure 2. Exemple d'un réseau ad hoc	3
Figure 3. Classification des protocoles de routage du réseau MANET	11
Figure 4. Exemple de la table de routage DSDV pour un réseau.....	13
Figure 5. Diffusion avec MPR (OLSR) vs diffusion sans MPR	14
Figure 6. La structure de message RREQ du protocole AODV.....	18
Figure 7. Processus de découverte du chemin du protocole AODV	18
Figure 8. Concept de zone du protocole ZRP	20
Figure 9. Un exemple de clustering du protocole CBRP	22
Figure 10. Le processus de découverte du protocole CBRP	23
Figure 11. Type des chemins multiples.....	25
Figure 12. La structure de la table de routage du protocole AOMDV	27
Figure 13. Exemple de processus de découverte du protocole AOMDV	28
Figure 14. Mode de consommation d'énergie.....	35
Figure 15. Classification des approches de conservation d'énergie.....	37
Figure 16. Cas de mouvement des nœuds	44
Figure 17. Classification des modèles de mobilité.....	46
Figure 18. Système logique de flou du protocole Fuzzy-AODV	50
Figure 19. La structure du message RREQ	53
Figure 20. La structure du message RREP	53
Figure 21. La structure des entrées de la table de routage du protocole ESMRsc	54
Figure 22. La structure de la table de routage du protocole EMSRsc.....	55
Figure 23. Exemple de deux distributions avec des différentes valeurs de coefficient de variation.....	57
Figure 24. L'énergie consommé vs la vitesse des nœuds	59
Figure 25. Le nombre de paquet reçue vs la vitesse des nœuds.....	60
Figure 26. Energie consommé vs vitesse pour Manhattan Grid mobilité	64
Figure 27. PDR vs vitesse pour Manhattan Grid mobilité	65
Figure 28. Overhead vs vitesse avec Manhattan Grid mobilité	66
Figure 29. L'énergie consommé et PDR vs vitesse pour RWP	66
Figure 30. Les phénomènes de propagation radio.....	69
Figure 31. Classification des LQEs.....	73
Figure 32. La structure du message Hello du RMQS-ua	87
Figure 33. La structure du message RREQ du RMQS-ua.....	87
Figure 34. La structure de la table de routage du RMQS-ua pour un nœud i	87
Figure 35. La différence entre PRR et PRR_enh	90
Figure 36. Exemple de processus de découverte du protocole RMQS-ua	93
Figure 37. Le PDR vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid.....	97
Figure 38. Overhead vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid	98
Figure 39. La consommation d'énergie normalisée vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid	98
Figure 40. Le débit vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid.....	99

Figure 41. La consommation d'énergie normalisée vs la vitesse des nœuds pour le modèle Random Waypoint.....	99
Figure 42. Le PDR vs la vitesse des nœuds pour le modèle Random Waypoint.....	100
Figure 43. Différentes métriques de performance vs le nombre des nœuds pour le modèle SMOOTH.....	101

Liste des tableaux

Table 1. Tableau de consommation d'énergie par différentes interfaces.....	35
Table 2. Paramètres de simulation du protocole ESMRsc	58
Table 3. Paramètres de simulation du protocole ESMRua.....	63
Table 4. Tableau comparative des LQEs	79
Table 5. Table de routage de l'exemple pour le protocole RMQS-ua	93
Table 6. Paramètres de simulation du protocole RMQS-ua.....	96

I.1.Introduction

Ces dernières décennies, la technologie de communication sans fil a été évoluée rapidement avec l'émergence des applications mobiles. Elle est en pleine expansion et attire plus d'attention avec un nombre de recherches incrémental. En effet, cette technologie devient la technique la plus commune par un grand nombre d'utilisateurs; elle présente un élément indispensable dans notre vie quotidienne qui supporte l'hétérogénéité des appareils utilisés (téléphone portable, laptop, etc.). Les réseaux sans fil utilisent la transmission en ondes radio au lieu de câblage en offrant la simplicité et la rapidité de mise en œuvre. En Plus, ils offrent une grande flexibilité d'utilisation indépendamment de l'emplacement géographique dans laquelle l'utilisateur peut se déplacer librement durant la communication tant qu'il reste dans la zone de couverture. L'importance du réseau sans fil conduit à l'apparition de nouvelles catégories dédiées telles que les réseaux ad hoc. Par ailleurs, l'utilisation de technologie sans fil a certaines limites comme la portée de la transmission qui est généralement limitée, la sensibilité des ondes qui peut être affectée par d'autres signaux, l'aspect de sécurité, etc.

Dans cette thèse, nous nous intéressons au routage dans les réseaux mobiles ad hoc, appelés MANETs (Mobile Ad hoc Network) qui se base sur un routage multi sauts afin d'établir la communication entre les entités mobiles autonomes. Ces entités mobiles ont généralement des capacités limitées: capacité de calcul et de stockage faible, utilisation de la batterie, etc. Le routage multi sauts dans les réseaux sans fil mobiles représente un défi très important qui reste toujours un axe de recherche ouvert à cause des contraintes qui affectent la performance du routage et aussi les caractéristiques de ce réseau. Il existe d'autres types de réseau sans fil, on cite : WSN (Wireless Sensor Network) qui est considéré comme étant un type particulier de réseau ad hoc dans lequel les nœuds sont des capteurs. Un WSN se compose d'un nombre d'entités autonomes qui sont réparties dans un espace pour surveiller les conditions environnementales ou physiques. Les capteurs coopèrent entre eux pour transmettre les informations observées vers un ou plusieurs points de collecte (des puits).WBAN (Wireless Body Area Network) qui est un ensemble de nœuds (capteurs corporels) placés dans ou sur le corps humain capable de détecter une ou plusieurs caractéristiques physiologiques pour surveiller l'état de santé d'un individu en temps réel (plusieurs applications telles que : la surveillance médicale à distance, le sport...); les données mesurées sont stockées puis transmet à un dispositif central. D'autres types de réseau ad hoc sont apparus conçus pour un contexte plus précis comme: VANET (Vehicular Ad hoc Network) dont les nœuds sont des véhicules qui ont une forte mobilité avec un déplacement limité par les rues, et FANET (Flying Ad hoc Network) dont les nœuds sont des drones qui se déplacent en 3D (un réseau ad hoc entre les drones par exemple).

Nous décrivons dans ce chapitre, des généralités concernant les réseaux sans fil, plus précisément les réseaux ad hoc mobiles (définition, caractéristiques, avantages, limites et

domaine d'application). Ensuite, nous présentons les problèmes et les défis de routage dans ce type de réseau. En fin, nous terminons ce chapitre par une présentation de nos contributions.

I.2. Définition d'un réseau sans fil

Le réseau sans fil (en anglais : Wireless network) est un réseau qui se compose d'un ensemble d'entités qui communiquent entre eux en utilisant des ondes hertziennes à travers leurs interfaces sans fil au lieu d'utiliser des supports de transmission physiques (câbles) [1]. En effet, il offre aux utilisateurs la possibilité de se connecter n'importe où et à tout moment. Le réseau ad hoc est caractérisé principalement par la notion de mobilité dont les utilisateurs sont capables de se déplacer librement durant la transmission des données [2].

Il existe trois modes de communication ([3],[4]) :

- Unicast : le nœud source transmet le message à un seul nœud spécifié (1 nœud vers 1 nœud).
- Multicast : le nœud source transmet le message à un groupe de nœuds (1 nœud vers quelques nœuds).
- Broadcast : le nœud source diffuse le message à tous les nœuds du réseau. Dans le réseau sans fil, seuls les nœuds voisins qui sont directement connectés (qui se trouvent dans la portée du nœud source) recevront ce message (1 nœud vers tous les nœuds).

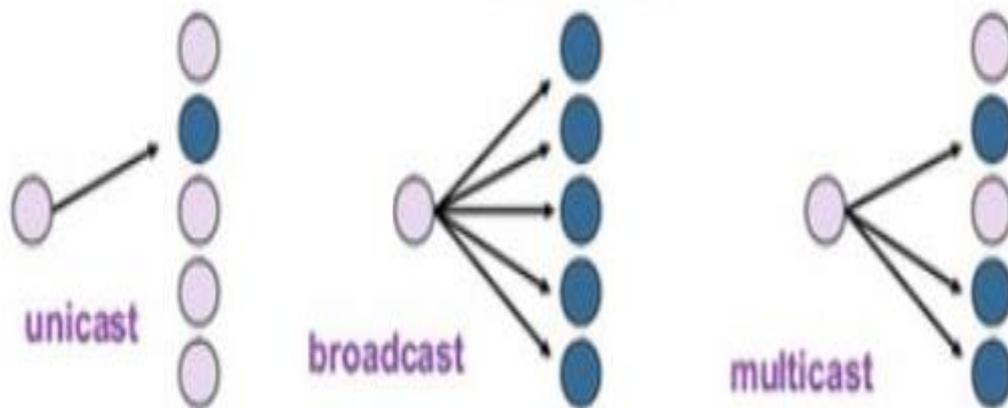


Figure 1. Mode de communication [4]

On distingue deux grandes familles de réseaux sans fil : avec et sans infrastructure.

- Réseau sans fil avec infrastructure : la communication entre les nœuds est assurée par des stations de base fixes qui sont liées entre eux par un réseau filaire. Par exemple le réseau 4G (4^{ème} génération).
- Réseau sans fil sans infrastructure : la communication entre les nœuds est effectuée en mode point à point (absence totale d'infrastructure ou de stations fixes). Si un nœud veut communiquer avec un autre nœud qui se trouve hors sa portée de la transmission, des nœuds vont participer à l'acheminement de données (en multi sauts). C'est le réseau ad hoc.

I.3. Définition d'un réseau ad hoc

Un réseau ad hoc mobile, appelé aussi MANET, est un ensemble de nœuds mobiles (entités) auto-configurés et autonomes (absence d'administration centralisée), qui communiquent entre eux via une interface sans fil sans l'aide d'infrastructure (équipement et câblage). Ces nœuds se caractérisent par leurs ressources modestes incluant une source d'énergie limitée (généralement des batteries) et des capacités de calculs limités. Les nœuds d'un réseau ad hoc se déplacent d'une manière libre dans une zone géographique et forment une architecture dynamique de réseau qui peut changer à tout moment [5].

Contrairement au routage dans un réseau filaire qui nécessite des routeurs, un nœud dans un réseau ad hoc peut assurer le rôle d'une hôte ou d'un routeur simultanément : une hôte (la source ou la destination) pour transmettre ou recevoir les données respectivement, et un routeur (un nœud intermédiaire) par la participation à l'acheminement des données. La communication entre deux nœuds peut être établie soit directement de bout en bout si l'un des deux nœuds est dans la portée de l'autre, ou bien des nœuds intermédiaires vont coopérer (en multi sauts jouant le rôle des routeurs) pour établir la transmission avec la destination dans le cas où l'un des nœuds ne serait pas dans la zone de couverture de l'autre [6].

Formellement, on peut définir un réseau MANET comme étant un graphe non orienté $G = (N, L)$, où N désigne les sommets qui représentent l'ensemble des nœuds dans ce réseau, et L désigne les arcs qui sont l'ensemble des liens directs (liaison) disponibles entre les différents nœuds. Notant qu'un lien $l_{i,j}$ entre deux nœuds i et j existe si le nœud i est situé dans la zone de couverture du nœud j , i.e. le nœud i peut communiquer directement avec j (on dit que j est un nœud voisin du nœud i) [7].

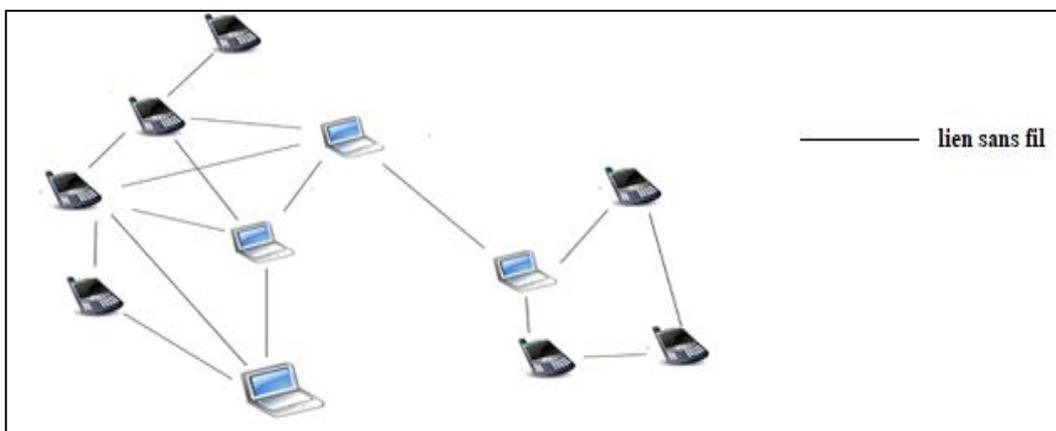


Figure 2. Exemple d'un réseau ad hoc

I.4. Caractéristique du réseau ad hoc

Le réseau ad hoc est un réseau sans fil particulier caractérisé par ([5], [8], [9], [10]):

- Topologie dynamique : les nœuds du réseau ad hoc sont mobiles et peuvent rejoindre ou quittent le réseau à tout moment d'une façon autonome. Le déplacement libre et imprévisible des nœuds ainsi que d'autres causes (la sensibilité des liaisons sans fil, la portée de la transmission radio limitée, la présence des obstacles...) provoquent un changement rapide et fréquent de la topologie du réseau.

- Absence d'infrastructure : le réseau ad hoc n'utilise aucune infrastructure ou équipements préexistants. Il n'a pas une administration centralisée dont tous les nœuds sont responsables d'établir et maintenir la communication, et peuvent prendre le rôle d'un routeur ou une hôte.
- Routage multi sauts : les messages seront transmis en saut à saut passant par les nœuds intermédiaires qui participent dans le routage dans le cas où le destinataire serait situé hors la portée de la transmission du nœud source.
- Contrainte d'énergie : Les nœuds dans les réseaux ad hoc ont une source d'énergie limitée qui est généralement des batteries. Chaque opération effectuée par un nœud consomme l'énergie, principalement l'échange des messages (la transmission et la réception). De plus, vu la mobilité des nœuds, il est difficile d'utiliser une source d'énergie permanente ou même recharger (ou remplacer) les batteries dans un temps opportun.
- Capacité du canal limité : la transmission des messages, plus précisément la bande passante à travers une interface sans fil reste toujours réduite par rapport au réseau filaire. Le réseau sans fil est aussi sensible aux phénomènes externes (bruit, obstacle qui affecte le signal...) ce qui conduit à un taux d'erreur considérable.
- Capacité du calcul limité : la puissance du calcul et la capacité de stockage sont faibles.
- Sécurité limitée : les réseaux sans fil ont un taux élevé d'attaque physique à cause de l'échange qui se base sur les ondes hertziennes telles que : DoS (Denial of Service), l'écoute, intrusion, etc.

I.5. Avantages et limites

Les réseaux ad hoc présentent plusieurs avantages, mais aussi ont certaines limites.

- **Avantages :**
 - Déploiement facile et auto-configuration : la tâche de déploiement et mise en place du matériel n'est plus nécessaire (ne requise aucun matériel). En conséquence, aucune configuration n'est requise parce que le réseau ad hoc est décentralisé (pas d'administration).
 - Coût : L'un des majeurs avantages du réseau ad hoc est l'absence de tous types d'infrastructure (routeur, serveur, câble, etc.). De plus, il n'a aucun coût supplémentaire d'entretien, maintenance ou déménagement.
 - Tolérance aux pannes : la défaillance de certains nœuds ou d'une liaison n'affecte pas le fonctionnement du réseau et il reste fonctionnel suite à l'absence de l'administration centralisée (tous les nœuds ont le même niveau).
 - La mobilité : l'utilisation du réseau sans fil permet aux nœuds du réseau ad hoc de se déplacer d'une manière libre.
 - Extensibilité : contrairement au réseau filaire, le passage à l'échelle est effectué tout simplement par l'ajout de nouveaux nœuds qui vont rejoindre le réseau sans besoin d'aucun moyen ou matériel

- **Limites :**

- Changement de topologie : à cause de la mobilité des nœuds et la limite de portée de la transmission, la topologie change d'une façon imprévisible et fréquente ce qui rendra la tâche de routage plus difficile.
- Sécurité limitée : l'une des faiblesses du réseau ad hoc est le problème de sécurité qui est difficile à maîtriser. Les messages sont exposés à l'écoute, l'intrusion et d'autres actions malveillantes.
- Contrainte d'énergie : les nœuds ont une source d'énergie limitée et épuisable.
- Erreur et perte de transmission : l'utilisation de liaison hertzienne augmente le taux d'erreur de transmission à cause de plusieurs phénomènes: l'affaiblissement du signal, problème des interférences, signal affecté par l'environnement...

I.6. Domaines d'application

Vu la simplicité, la rapidité et l'adaptation du réseau ad hoc, il peut être utilisé dans de nombreux domaines. Le réseau ad hoc est plus adapté et plus pratique dans certaines situations par rapport au réseau filaire (à cause de la nature du terrain), ou dans le cas de détérioration d'infrastructure qui n'est plus utilisable (sabotage, catastrophe naturelle...).

Nous citons quelques domaines d'application ([11], [12]):

- **Opération militaire** : lors des opérations militaires, il est possible d'utiliser le réseau ad hoc pour assurer la communication entre les différentes unités d'armées.
- **Opération de secours** : dans les situations d'urgence et de secours, comme une catastrophe naturelle (inondation, tremblement de terre...) dont l'infrastructure sera généralement détruite ce qui provoque un isolement total de communication ; un réseau ad hoc est indispensable dans telle situation et il sera déployé rapidement.
- **Éducation** : lors d'une séance de travail ou une conférence, ce qui permettra aux participants de communiquer entre eux et partager les ressources sans besoin d'infrastructures.
- **Villes intelligente:** (smart cities) c'est un terme récent qui définit l'intégration de la technologie de l'information et de la communication dans notre vie quotidienne. Une ville intelligente comprend de nombreuses technologies et exploite les informations collectées pour faciliter la vie quotidienne de l'individu.

I.7. Problématique du réseau ad hoc

Les nœuds dans le réseau ad hoc sont interconnectés en utilisant des interfaces sans fil pour transmettre les messages (principalement les paquets de données) dans une portée limitée. Alors, si un nœud est situé hors portée, le message transmis doit passer par des nœuds intermédiaires afin d'atteindre sa destination (c'est la communication multi sauts). Le routage est une stratégie qui permet de découvrir à tout moment, les chemins d'un nœud source vers le nœud destination pour établir la communication et déterminer le meilleur chemin pour acheminer les paquets de données d'une manière efficace en assurant la continuité de

transmission ([1], [13]). De plus, il doit maintenir et adapter les chemins à tout changement de la topologie.

Il existe plusieurs protocoles de routage du réseau filaire utilisé actuellement, mais ils sont inappropriés dans les réseaux MANETs en raison des caractéristiques de ces réseaux. La mobilité des nœuds, l'architecture dynamique, contrainte d'énergie et la liaison sans fil présentent des contraintes importantes pour un routage efficace de données. En effet, le routage est un problème difficile qui doit prendre en considération les différents défis de ce réseau en conservant la performance du réseau.

Le routage dans un réseau MANET repose généralement sur trois phases : le processus de découverte pour découvrir les chemins possibles, la sélection du meilleur chemin et la maintenance des chemins. Les protocoles de routage sont classifiés en trois classes : protocole proactif, protocole réactif et protocole hybride ([14],[15]). Le principe de chaque processus se diffère d'une classe à l'autre. Les protocoles proactifs sont basés sur les algorithmes de routage classiques conçus pour réseaux filaires (état de lien et vecteur de distance) ; il permet de trouver et maintenir les chemins vers tous les nœuds par l'échange périodique des informations de routage dont chaque nœud connaîtra la topologie complète du réseau. Il présente comme avantage l'établissement immédiat de la transmission (sans aucun délai) à cause de la disponibilité des informations sur les chemins au préalable. Par contre, ils ont certaines faiblesses vu qu'ils échangent périodiquement les informations de routage ce qui génère un volume important de données induisant la surcharge du réseau et affectant les ces ressources.

La deuxième classe est les protocoles réactif ; leur principe est de découvrir les chemins s'il y a des données à transmettre (à la demande) et non pas d'une manière continue tel que le routage proactif. Les protocoles réactifs utilisent le concept de requête-réponse par l'inondation du message de requête dans le réseau jusqu'à ce que le nœud destination soit atteint. Le point fort de cette classe est qu'elle ne génère aucun message de contrôle inutile ce qui conserve les ressources du réseau. Son inconvénient principal est le délai d'initialisation de communication.

La troisième classe est une combinaison des deux approches (proactive et réactive), appelée protocoles hybrides afin d'exploiter les avantages de ces deux approches. Les protocoles hybrides organisent le réseau en deux zones. Ils appliquent un routage proactif dans la première zone (en local) pour découvrir le voisinage (un nombre prédéfini de sauts) et un routage réactif hors la zone locale.

Les protocoles à chemin unique ont la capacité de trouver un seul chemin entre un nœud source et un nœud de destination, mais à cause de la mobilité des nœuds, les contraintes d'énergie et de la qualité du signal, ce chemin peut être rompu. En effet, après la détection de coupure, le nœud source lance de nouveau le processus de découverte du chemin afin de rétablir la communication. Cela influence négativement sur les performances du réseau et épuise ses ressources. Une approche a été proposée pour éviter une telle situation, appelée le routage « multi chemins ». Il permet de trouver plusieurs chemins durant le même processus de découverte [16]. En cas de coupure, il bascule la transmission de paquets vers un chemin alternatif actif au lieu de déclencher une nouvelle découverte. Le processus de découverte est

déclenché si et seulement si tous les chemins découverts deviennent inactifs. Cette solution conserve considérablement les ressources du réseau en matière de bande passante, d'énergie des nœuds, de délai ainsi que le taux des pertes des paquets.

I.8. Contribution et Plan de la thèse

Nous avons vu précédemment qu'un réseau ad hoc est un ensemble de nœuds mobiles qui communiquent entre eux par des interfaces sans fil formant une topologie dynamique, ces nœuds ont des capacités limitées telles que l'énergie. Les nœuds consomment l'énergie durant leur fonctionnement, mais la tâche qui consomme plus d'énergie est l'échange des messages durant la communication (principalement l'envoi et la réception). Une mauvaise gestion de l'énergie résidentielle des nœuds épuise rapidement la batterie ce qui implique la disparition du nœud du réseau. La défaillance d'un grand nombre de nœuds réduit considérablement la durée de vie du réseau.

En plus, la notion de mobilité mène à un changement fréquent de la topologie et conduit à des ruptures des liens des chemins ce qui engendre la relance du processus de découverte pour restaurer la communication. Le protocole de routage utilise des messages de contrôle afin de trouver et maintenir les connectivités entre les différents nœuds. Plusieurs travaux de recherche attestent que les protocoles de routages classiques basés sur le nombre de sauts comme une métrique de sélection des chemins peuvent affecter les performances du réseau. Le chemin le plus court en matière de nombre de sauts n'est pas forcément le chemin optimal ; cette métrique ignore toutes les contraintes qui affectent la transmission (l'énergie, la stabilité, la qualité de signal...) ainsi que la fiabilité du protocole. De ce fait, il est nécessaire d'évaluer la stabilité des liens afin d'éviter l'impact négatif de la mobilité sur la performance du réseau.

Un autre paramètre qui peut affecter le routage dans les réseaux ad hoc est l'environnement. La mobilité dans un espace libre est totalement différente à la mobilité dans un milieu urbain comme une ville. Le déplacement des nœuds dans un milieu urbain est restrictif par la présence des différents obstacles (bâtiments, routes, etc.) qui affecte la mobilité et aussi le signal ; un environnement urbain est caractérisé par la présence de plusieurs sources de signaux externes qui affectent le signal.

Dans cette thèse, nous nous intéressons au routage multi chemins basés sur les contraintes de stabilité et d'énergie dans un milieu urbain. Notre objectif principal est d'améliorer les performances des réseaux ad hoc en proposant des solutions protocolaires de routage stable et économe en énergie dans un environnement réaliste.

Notre première proposition est un protocole de routage multi chemins, basé sur la stabilité et l'énergie dans un milieu urbain appelé ESMR-sc [17] (Energy aware and Stable Multipath Routing Protocol for Ad hoc Networks in Smart City). Notre protocole est basé sur le protocole AOMDV [18] (Ad hoc On demand Multipath Distance Vector) qui est un protocole réactif permettant de découvrir les chemins à la demande par l'inondation d'un message de broadcast dans le réseau jusqu'à la destination. Nous avons combiné deux contraintes pour évaluer les chemins disponibles entre un nœud source et un nœud destination: la stabilité des liens composant le chemin et l'énergie des nœuds. Les valeurs de

stabilité et de l'énergie sont collectées lors du processus de découverte en exploitant les messages de contrôle afin d'optimiser le flux de contrôle généré. Notre objectif est de sélectionner le chemin qui offre une bonne stabilité avec une valeur d'énergie supérieure dans un milieu urbain. Les chemins disponibles seront classés en ordre décroissant sur la base de la fonction objective qui combine la stabilité et l'énergie. Le chemin ayant la valeur maximale est sélectionné pour la transmission (il représente le chemin qui est le plus stable avec une moyenne d'énergie bonne). Si une rupture du chemin est détectée, un message d'erreur sera reçu par la source qui va supprimer le chemin perdu, évaluer les chemins disponibles et sélectionner le chemin le plus adapté suivant la valeur de la fonction objective. ESMR-sc améliore les performances des réseaux ad hoc en matière de taux de livraison des paquets, overhead et de la consommation d'énergie.

Nous avons proposé ensuite une extension de notre première contribution, à savoir ESMR_{ua} (Efficient Energy Aware Link Stable Multipath Routing Protocol for Mobile ad hoc Networks in Urban Areas) [19]. Le protocole ESMR_{ua} utilise le même principe que le protocole ESMR-sc en se basant sur la stabilité et l'énergie, mais avec trois variantes de calcul de la stabilité (coefficient de variation basé sur : l'écart-type, l'écart-type absolu, l'écart-type exponentiel). Nous avons introduit aussi un coefficient de qualité pour estimer la fonction de la stabilité afin de distinguer entre les différents chemins. Une fois le processus de découverte est terminé, le nœud source aura un ou plusieurs chemins vers le nœud de destination ; les chemins trouvés seront classifiés en fonction de la fonction objective pour les trois variations. Les résultats de simulation montrent que le protocole ESMR_{ua} assure une transmission fiable et préserve l'énergie des nœuds.

Nous avons proposé aussi un nouveau protocole de routage nommé RMQS-ua [20] (Reliable Multipath routing protocol based on Link Quality and Stability in Urban Areas) basé sur les contraintes de stabilité et de la qualité du signal. Le protocole RMQS-ua est conçu pour les milieux urbains ; les signaux dans les milieux urbains peuvent être affectés par rapport à un espace ouvert, vu la présence des obstacles, le taux élevé d'interférence et des signaux externes (tel que le bruit). De ce fait, nous avons développé une nouvelle métrique d'estimation de qualité qui combine deux estimateurs : le SNR (Signal-to-Noise Ratio) et le PRR (Packet Reception Ratio) en prenant en compte le nombre des paquets successifs perdus. Nous avons utilisé une fonction objective qui combine les deux contraintes (la stabilité et la qualité de signal), qui sera utilisée dans le processus de sélection des chemins. Le chemin avec la grande valeur de la fonction objective sera sélectionné pour la transmission (i.e. le chemin le plus stable qui avec une meilleure qualité de signal). Les résultats de simulation montrent que notre protocole RMQS-ua est fiable et améliore les performances des réseaux ad hoc.

Enfin, tous les protocoles conçus ont été implémentés sous NS2 (Network Simulator 2) et évalués dans des modèles de mobilité aléatoires, non-aléatoires et humains.

Plan de la thèse

La suite de la thèse est organisée en six chapitres. Le chapitre 2 représente un état de l'art sur le routage dans les réseaux ad hoc en présentant les classes de routage avec quelques protocoles ainsi que l'aspect de routage multi chemins. Nous avons discuté ensuite dans le

chapitre 3 le routage avec contrainte de stabilité et d'énergie en citant quelques protocoles de la littérature. Nous présentons dans le chapitre 4 nos deux contributions : les protocoles ESMR-sc et ESMRua basés sur la stabilité et l'énergie.

Le chapitre 5 décrit la particularité de routage dans les milieux urbains en développant les notions du signal, les différents estimateurs de qualité, ainsi qu'une étude sur certains protocoles de routage basés sur la contrainte de la qualité du signal. Nous introduisons dans le chapitre 6 notre protocole de routage multi chemins RMQS-ua, qui est basé sur la stabilité et la qualité du signal. Enfin, on conclut notre thèse par une analyse des propositions et une description des travaux futurs.

Chapitre II

Routage dans les réseaux ad hoc

Un réseau ad hoc mobile est composé d'un ensemble de nœuds dispersés dans un espace et interconnectés à travers des interfaces sans fil. Nous avons présenté dans le chapitre précédent les problématiques et les difficultés rencontrées pour la mise en place d'un protocole de routage d'un réseau MANET. Le protocole de routage permet d'assurer un bon acheminement de données à tout moment entre une source et une destination quelconque (en multi sauts) en conservant les ressources du réseau.

Les protocoles de routage peuvent être classés selon plusieurs critères : la structuration du réseau (plat ou hiérarchique) dont laquelle les nœuds sont considérés soit de même niveau ou de plusieurs niveaux, les contraintes de routage (utilisé pour évaluer et déterminer les chemins tels que l'énergie, la mobilité, etc.), ou le type de découverte du chemin (proactif, réactif et hybride). Cette classification est conçue pour un routage à un seul chemin. Un autre concept de routage appelé routage multi chemins permet de découvrir plusieurs chemins au lieu d'un seul.

Dans ce chapitre, nous présentons en premier temps la classification des protocoles de routage en citant quelques protocoles de base connus pour chaque catégorie. Nous terminerons la première partie par une étude comparative entre les classes de routage. Ensuite, nous aborderons le routage multi chemins.

II.1. Classification des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc

Suivant la méthode de découverte et de maintien des chemins (i.e. le mode de fonctionnement), les protocoles de routage ont été classifiés en trois grandes classes: proactif, réactif et hybride ([21], [22]). La classe proactive permet de maintenir pour chaque nœud une vision globale sur la topologie du réseau par l'échange périodique des messages de la table de routage entre les nœuds et ceci même s'il n'y a pas de données à envoyer. Le protocole réactif permet de découvrir les chemins à la demande seulement, par l'inondation des messages de découverte pour trouver la destination. La troisième classe combine les deux familles précédentes, généralement par principe de zone (pour les grands réseaux) afin d'exploiter leurs avantages [23].

Les protocoles de routages peuvent être classifiés aussi suivant la structure du réseau utilisée : plat ou hiérarchique. Une structure plate signifie que tous les nœuds sont de mêmes niveaux. Cependant, la structure hiérarchique est multi niveaux dont les nœuds n'ont pas le même niveau (par exemple : un chef du groupe et des membres). Dans ce type, chaque niveau a des fonctionnalités spécifiques. La Figure 3 montre la classification des protocoles de routage.

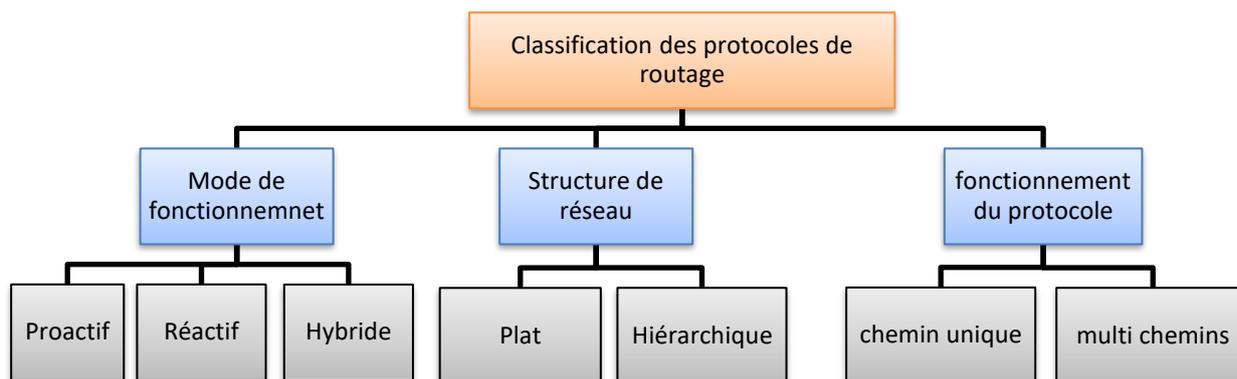


Figure 3. Classification des protocoles de routage du réseau MANET

II.1.1. Protocole proactif

Les protocoles de routage proactifs se basent sur le même concept des protocoles de routage du réseau filaire (table-driven en anglais) [24]. Un protocole proactif maintient une vision globale sur la topologie du réseau au préalable; c'est-à-dire : à tout moment, chaque nœud connaît tous les chemins possibles vers tous les autres nœuds du réseau. Ce type de protocole comporte le principe de la diffusion des messages de contrôle périodiquement. Ces messages contiennent les informations de table de routage. Chaque nœud après avoir reçu le message, calcule le plus court chemin suivant les informations contenues dans ce message et met à jour leurs tables de routage suivant les nouveaux changements afin de garder une vue fraîche de la topologie.

Les protocoles proactifs peuvent être divisés en deux catégories : vecteur de distance (Distance Vector) et état de lien (Link State) [25]. Ces deux catégories comportent le même fonctionnement, la seule différence est le processus de calcul du plus court chemin: vecteur de distance prend le nombre de sauts comme un paramètre d'évaluation pour la construction des chemins et le calcul du plus court chemin ; mais l'état de lien prend d'autres paramètres liés à la qualité des liens pour calculer le coût, déterminer le meilleur chemin et construire la vision globale.

Dans le protocole proactif, chaque nœud dispose une vue globale du réseau ainsi que tous les chemins disponibles [26]. Donc, nous pouvons dire que l'avantage majeur est le gain des délais, le nœud source établit immédiatement la transmission vu qu'il connaît à l'avance le chemin sans avoir besoin d'attendre la découverte du chemin. Par contre, le processus d'échange périodique des informations sur les chemins qui peut aussi invoquer suite la détection du changement de la topologie, implique une consommation considérable d'énergie des nœuds et la bande passante du réseau (nombre des messages de contrôle important). Il utilise ces ressources mêmes dans le cas où nous n'avons aucune communication entre les nœuds (consommation constante) conduisant à une dégradation des performances du réseau. De plus, il nécessite un espace de stockage important afin de sauvegarder tous les chemins, cela pose un problème pour les grands réseaux.

Nous décrivons ensuite le fonctionnement des deux protocoles de routage proactif : le premier est basé sur le vecteur de distance, appelé DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Protocol) [27] et le deuxième est basé sur l'état de lien, appelé OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) [28].

II.1.1.1. Le protocole DSDV

Le protocole DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Protocol) est l'un des premiers protocoles pour les réseaux ad hoc; c'est un protocole de routage proactif de type vecteur de distance basé sur l'algorithme de Bellman Ford qui est utilisé aussi dans le protocole du réseau filaire RIP (Routing Information Protocol) ([21],[27]). L'algorithme de Bellman Ford souffre du problème de boucle de routage dans la topologie dynamique. Pour éviter ce problème, DSDV s'adapte par l'intégration du concept de numéro de séquence qui reflète la fraîcheur des chemins afin d'éliminer les boucles de routage (routing-loop).

Chaque nœud dans le réseau maintient une table de routage contenant des entrées vers tout nœud accessible; chaque entrée contient le prochain saut, nombre de sauts et le numéro de séquence qui correspond au nœud destination [29].

Afin d'assurer une vision globale et à jour des chemins pour tous les nœuds, chaque nœud diffuse à ses voisins directs des messages de routage. La diffusion est invoquée soit immédiatement à cause d'un événement (en cas de détection d'un changement de la topologie comme la défaillance d'un nœud, coupure d'un lien, etc.), ou périodiquement à chaque intervalle de temps spécifique.

Lorsqu'un nœud détecte une coupure vers un nœud voisin, il affecte la valeur infinie au nombre de sauts et incrémente le numéro de séquence de ce chemin (information fraîche sur ce lien) et diffuse immédiatement un message de routage afin d'annoncer la coupure de ce lien. De plus, si un nœud reçoit un message de routage, il met à jour sa table de routage en comparant les informations contenues dans le message avec ceux qui sont dans la table. Les entrées de routage seront changées en cas où la valeur du numéro de séquence enregistré dans la table est inférieure à la valeur dans le message ce qui signifie un chemin plus récent ou un chemin plus court (en matière de nombre de sauts) s'ils ont la même valeur du nombre de séquence. Ce message sera retransmis avec la même procédure jusqu'à ce que le message soit reçu par tous les nœuds du réseau.

La Figure 4 présente la table de routage d'un nœud à un moment donné qui correspond à l'exemple.

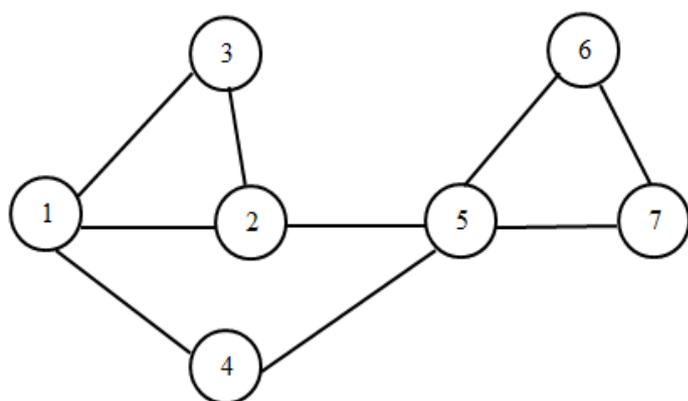


Table de routage : Nœud 2

Dest	Next	Hop	N Seq
1	1	1	100
3	3	1	96
5	5	1	142
4	1	2	56
6	5	2	22
7	5	2	154

Figure 4. Exemple de la table de routage DSDV pour un réseau

Le protocole DSDV utilise deux types de messages de routage afin de réduire le trafic de message de routage [27]:

- Mise à jour complète : correspond à l'envoi de la totalité de la table de routage.
- Mise à jour incrémentale : correspond à l'envoi des entrées de la table de routage qui sont affectées par un changement récent seulement. Ce type est utilisé généralement dans le cas événementiel, ou dans le cas d'une petite partie est changée depuis la dernière mise à jour périodique.

Le protocole DSDV s'adapte plus dans le réseau MANET avec une faible mobilité. Il est capable d'établir immédiatement la communication vu qu'il possède au préalable le chemin vers la destination. Cependant, il est caractérisé par une lente convergence parce que le nœud attend la réception du message de la part de la destination pour mettre à jour le chemin ; en outre, il génère un volume important et constant du trafic de contrôle même en cas d'absence d'échange de données entre les nœuds, donc le passage à l'échelle sera très difficile, coûteux et aussi une consommation excessive d'énergie.

II.1.1.2. Le protocole OLSR

Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) est un protocole proactif à état de lien. Le concept principal de ce protocole est d'introduire la notion des relais multipoints MPR (Multi Point Relay) afin d'optimiser le flux de contrôle généré et réduire la consommation de la bande passante par l'élimination des diffusions redondantes dans la même région (si une région comporte plusieurs nœuds, alors tous les nœuds vont diffuser le message). Il choisit le chemin optimal selon le nombre de sauts en prenant en considération l'état de lien qui doit être symétrique (communication possible dans les deux sens : i.e. lien bidirectionnel) ou non parce que la propagation radio rend certains liens unidirectionnels (les liens asymétriques seront ignorés lors de la construction de table de routage). La table de routage est calculée en se basant sur une table de topologie et la table des voisins [28].

Comme tous les protocoles proactifs, OLSR se base sur l'échange périodique des messages de contrôle pour déterminer les voisins, découvrir les chemins et maintenir la table de topologie. Il utilise deux types de messages de contrôle : message *Hello* pour la détection des voisins et la sélection des MPRs, un message de topologie appelé *TC* (Topology Control)

contenant la liste des nœuds MPRs et leurs numéros de séquence associés. Ces informations seront utilisées pour construire la table de topologie.

Détection des voisins : Chaque nœud diffuse périodiquement un message *Hello* contenant la liste des nœuds voisins avec l'état des liens avec chaque nœud d'entre eux dont l'état peut être : symétrique, asymétrique, perdu ou MPR :

- Lien symétrique : signifie que le lien a été vérifié dans les deux sens (bidirectionnels).
- Lien asymétrique : signifie que le lien a été vérifié dans un seul sens (réception) vu que le nœud a reçu un message Hello du nœud voisin, mais n'est pas encore validé dans l'autre sens.
- Lien MPR : indique que ce nœud a choisi ce voisin comme MPR.
- Lien perdu : signifie que le lien correspondant est perdu.

Au début, les nœuds annoncent leur présence par un message *Hello* qui contient une liste des voisins vide. Grâce à ces messages, tous les nœuds construisent la table des voisins et acquièrent aussi des informations concernant les nœuds jusqu'à deux sauts. Le message *Hello* est utilisé pour détecter les voisins directs et vérifier le lien s'il persiste ou non afin de les enregistrer dans une table des voisins.

Sélection des MPRs : L'ensemble des MPRs est un sous-ensemble minimal des nœuds voisins (à un seul saut) dont ce nœud peut atteindre tous les nœuds à deux sauts ([3], [28]). Cela va réduire considérablement le nombre de messages de contrôle diffusé dans le réseau (voir Figure 5). En exploitant les informations collectées par les messages *Hello* reçus, chaque nœud peut calculer l'ensemble MPR (indépendamment des autres nœuds) parmi leurs voisins directs en satisfaisant les conditions requises en prenant seulement les liens symétriques dans ce processus. Suite la mobilité des nœuds et après la réception d'un message *Hello*, l'ensemble des MPRs peut être recalculé afin de s'adapter à tout changement possible de la topologie qui touche les nœuds à un seul saut ou à deux sauts (nouveau nœud rejoint, perte d'un lien).

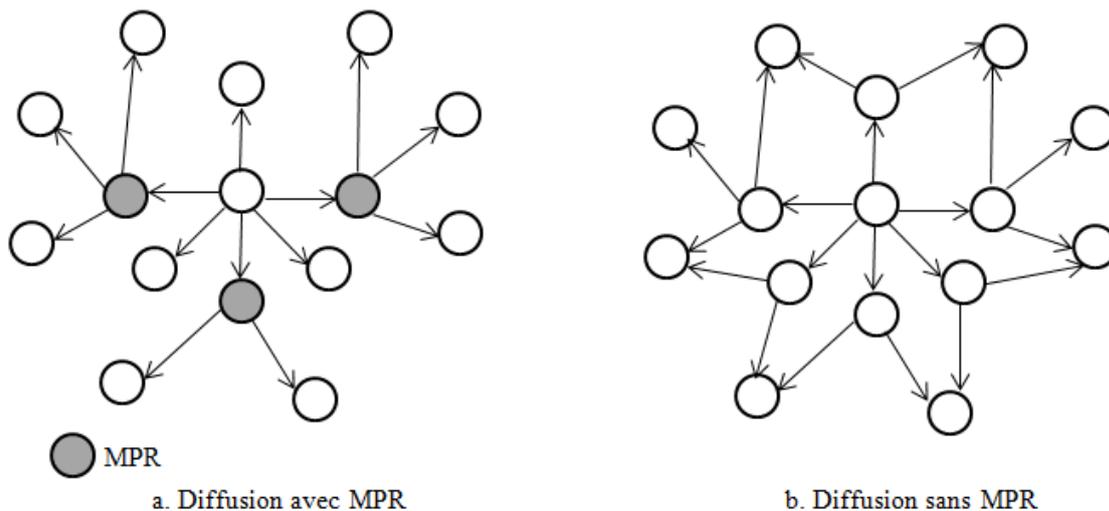


Figure 5. Diffusion avec MPR (OLSR) vs diffusion sans MPR

Gestion de la topologie : après la sélection des MPRs et dans le but de diffuser les informations de routage afin d'avoir une vue de la totalité du réseau au niveau de chaque

nœud ; chaque nœud diffuse par inondation périodiquement un message de topologie *TC* vers tous les nœuds (les nœuds n'ayant aucun MPR ne génèrent aucun message *TC*). Ce message contient la liste des nœuds voisins qui ont choisi l'émetteur comme un MPR pour aider les autres nœuds à construire et maintenir la table de topologie. Un numéro de séquence est attribué pour cet ensemble et sera incrémenté après chaque changement de ce dernier. La table de topologie se compose d'une série de paires connectées {X, Y} dont X est le nœud destination (qui a généré le message *TC*) et Y est le dernier nœud MPR. Les messages *TC* sont traités par chaque nœud, mais seulement les nœuds MPRs peuvent les retransmettre [28].

Table de routage et sélection du chemin : dans OLSR, la table de routage est calculée sur la base des informations contenues dans la table topologie et la table des voisins [1]. En effet, toute modification enregistrée dans l'une de ces deux tables requiert un recalcul de la table de routage. Le protocole OLSR applique l'algorithme de Dijkstra pour déterminer le plus court chemin en matière de nombre de sauts et remplir la table de routage.

Le protocole OLSR diminue le nombre de messages de contrôle transmis, ce qui implique une utilisation réduite de la bande passante. Cependant, il n'est adapté ni pour les réseaux à faible densité vu que tous les voisins directs sont des MPR, ni pour les réseaux de haute mobilité vu qu'il souffre d'un taux de recalcul des MPRs et table de routage très élevée, alors cette notion devient inutile. De plus, il nécessite un espace de stockage important (l'utilisation de trois tables : des voisins, de topologie et de routage).

II.1.2. Protocole réactif

Contrairement au protocole proactif qui maintient la table de routage à tout moment en assurant des chemins vers tous les nœuds accessibles par l'échange périodique des messages de contrôle, même s'ils ne sont jamais utilisés. Le routage réactif (appelé en anglais: on-demand) crée les chemins à la demande en se basant sur le concept de requête-réponse. Il ne maintient que les chemins actifs afin de minimiser la consommation de la bande passante. Si un nœud veut transmettre des données vers un nœud de destination et s'il n'y a aucun chemin disponible, il lance un processus de découverte du chemin par l'inondation d'un message de requête vers tous les nœuds voisins qui retransmettent le message jusqu'à atteindre le nœud de destination. Une fois que le nœud de destination reçoit la requête, il répond au nœud source qui commencera la transmission de données dès qu'il reçoit la réponse. Une opération de maintenance est mise en place afin de restaurer les chemins en cas d'une coupure d'un ou plusieurs liens. Chaque nœud échange périodiquement de messages *Hello* pour vérifier la connectivité avec ses nœuds voisins.

Les protocoles de routage réactif sont classifiés en deux catégories selon la méthode de découverte du chemin appliquée [5]:

- **Routage source (source routing)**: durant le processus de découverte, la requête collecte la série des nœuds intermédiaire jusqu'à atteindre le nœud de destination. À l'arrivée du message de réponse au niveau du nœud source, il va contenir la liste des adresses des nœuds composant le chemin trouvé à partir de nœud source jusqu'au nœud destination. Ainsi, les paquets de données portent cette liste dans leur en-tête et

il est acheminé directement passant par les nœuds intermédiaires en exploitant ces informations sans avoir besoin à maintenir la table de routage.

- **Routage saut par saut (hop by hop):** appelé aussi apprentissage en arrière, les paquets de données et les messages de contrôle ne comporte que l'adresse de destination. Alors, l'acheminement des paquets de données se fait par le maintien des chemins dans la table de routage au niveau de chaque nœud. Au cours de la découverte, chaque nœud intermédiaire enregistre le chemin inverse (vers le nœud source) avant de rediffuser le message de requête en broadcast afin qu'il puisse envoyer la réponse en utilisant ce chemin plus tard. La même opération est faite quand un nœud reçoit la réponse en maintenant le chemin vers la destination.

Le routage proactif réduit le flux des messages de contrôle généré, car il ne lance aucun message qu'en cas de besoin. Il s'intéresse à maintenir les chemins actifs seulement et pas tous les nœuds composant le réseau. Mais il a un problème de délai pour rétablir la communication à cause du processus de découverte dont le nœud source doit attendre une réponse (i.e. le chemin trouvé vers le nœud de destination) avant de commencer la transmission des données [10]. Un autre point négatif est le volume de trafic lors de l'opération de découverte qui surcharge le réseau.

Parmi les protocoles réactifs les plus connus, nous citons : DSR (Dynamic Source Routing) [30] qui utilise le principe de routage source et AODV (Ad Hoc On demande Distance Vector Routing) [31] qui utilise le principe de routage saut par saut. Dans la partie suivante, nous allons présenter le fonctionnement de ces deux protocoles.

II.1.2.1. Le protocole DSR

Le protocole DSR (Dynamic Source Routing) est un protocole réactif qui utilise la technique de routage à source pour acheminer les données. La source indique d'une façon explicite dans l'entête des paquets le chemin complet que le paquet doit traverser afin d'atteindre la destination ([30], [32]). Donc, les nœuds intermédiaires n'ont pas besoin de maintenir les informations de routage dès que le chemin est compris dans l'entête de chaque paquet. Notant que chaque nœud enregistre le chemin inclus dans l'entête de paquet dans leur cache pour les futures utilisations. Le protocole DSR n'utilise aucun message de contrôle périodique pour vérifier la connectivité.

Il se base sur deux mécanismes : découverte du chemin par l'inondation d'une requête jusqu'à atteindre la destination et la maintenance du chemin pour avertir la source concernant la perte d'un lien (seulement pour les chemins actifs)[33].

Processus de découverte : Lorsqu'un nœud communique avec un autre nœud, il consulte premièrement son cache s'il contient un chemin vers ce nœud. Si aucun chemin n'est trouvé, le nœud source initialise une découverte par la diffusion d'une requête *RREQ* (Route Request) dans le réseau. La requête contient l'adresse de source et de destination et un identifiant (*ID*). Chaque nœud intermédiaire qui reçoit cette requête vérifie s'il a déjà reçu ce message (en examinant l'unicité de l'*ID*), si cette requête est déjà traitée, il ignore ce dernier (seulement la première requête portant cet *ID* sera traitée). Dans le cas contraire, il peut répondre directement par une réponse *RREP* (Route Reply) dans le cas où il connaît un chemin vers le

nœud de destination en fusionnant le chemin existant dans l'entête avec le chemin depuis ce nœud vers le nœud destination (ce que nous donne le chemin complet); sinon, il insère son adresse dans l'entête de requête et rediffuse le message [34]. Ce processus se répète jusqu'à atteindre le nœud de destination. Le nœud de destination génère un message de réponse en indiquant dans l'entête le chemin complet. Ensuite, il transmet cette réponse en unicast au nœud précédent qui est lue à partir de l'entête du message. À la réception de la réponse par le nœud source, il rétablit la transmission des données en ajoutant le chemin complet vers le nœud de destination dans l'entête.

Processus de maintenance : Le processus de maintenance est la manière de détecter et de réagir à une coupure d'un lien vu le changement de la topologie. Dans le protocole DSR, chaque nœud appartenant à un chemin actif doit confirmer la bonne réception des paquets en utilisant des accusés de réception. Si un nœud détecte un problème de transmission, il va considérer ce lien comme un lien coupé et génère un message d'erreur *RERR* (Route Error) en spécifiant le lien perdu. Ce message d'erreur sera transmis immédiatement au nœud source. Ainsi, le nœud source supprime le chemin concerné et tous les autres chemins qui utilisent ce lien et vérifie s'il y a un chemin alternatif dans sa cache ; si aucun chemin n'est trouvé, une nouvelle opération de découverte sera déclenchée.

L'avantage principal du protocole DSR est l'absence des messages de contrôle de type *Hello*, ce qui réduit la consommation de la bande passante et l'énergie des nœuds. Mais il porte certaines limites : la taille du message de données devient plus grande surtout dans le cas de réseau à grande densité (problème de passage à l'échelle). De plus, comme tous les protocoles réactifs, le volume du flux de contrôle généré lors de la découverte du chemin, ainsi que le délai d'établir la communication.

II.1.2.2. Le protocole AODV

Le protocole AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) est un protocole réactif similaire au protocole DSR dans le concept général (l'utilisation des messages de type requête et réponse), repose sur deux mécanismes: découverte et maintenance. La seule différence est la méthode de découverte dont il utilise le principe de routage saut par saut (contrairement au DSR qui utilise un routage source). Le protocole AODV représente une amélioration du protocole DSDV (utilisation de table de routage à vecteur de distance avec l'utilisation de numéro de séquence) par l'utilisation du principe à la demande [35]. Nous pouvons dire qu'AODV est la version réactive du protocole DSDV.

Chaque nœud maintient la table de routage qui contient : la destination, le nœud suivant (next hop), nombre de saut, numéro de séquence, temps d'expiration. De plus, tout nœud qui possède un chemin actif diffuse périodiquement un message *Hello* pour vérifier la connectivité [31].

Processus de découverte : Ce processus est lancé si un nœud veut transmettre des paquets de données à un autre nœud qui ne possède aucun chemin actif. À ce moment, le nœud source diffuse à tous ses voisins une requête (*RREQ*) en lui attribuant un numéro de diffusion (nommé *broadcast_id*) et initialise la valeur de *hopcount* (nombre de sauts) par 0. La Figure 6 présente la structure du message *RREQ*.

Source ID	Numéro de Séquence Source	Destination ID	Numéro de Séquence Destination	Broadcast_ID	Hopcount
-----------	---------------------------	----------------	--------------------------------	--------------	----------

Figure 6. La structure de message RREQ du protocole AODV

À la réception d'un *RREQ*, le nœud intermédiaire vérifie si le *RREQ* est déjà reçu précédemment (par le champ *Broadcast_ID*). S'il est le premier *RREQ* et ce nœud n'a aucun chemin vers la destination, il ajoute le chemin inverse (vers la source) dans la table de routage, ainsi il incrémente le champ *hopcount* et rediffuse la requête. Toutes les requêtes dupliquées seront ignorées. La réponse (*RREP*) est retournée soit par un nœud intermédiaire dans le cas où il posséderait un chemin vers la destination ou si la destination est atteinte. Le message *RREP* retourné passant par le chemin inverse est enregistré au niveau des nœuds intermédiaires. Les nœuds intermédiaires maintiennent aussi le chemin vers la destination durant le passage de la réponse dans leurs tables de routage. À la fin, le nœud source aura un chemin vers le nœud de destination et lancera la transmission de données. AODV utilise le même concept de numéro de séquence que DSDV afin d'éviter le problème de boucle de routage.

AODV choisit le plus court chemin en matière de nombre de sauts. Quand un nœud reçoit un message de réponse *RREP*, il le transmet directement. S'il reçoit d'autres réponses, il mettra à jour sa table de routage et retransmettra ce message si et seulement ce message a un numéro de séquence élevé (route plus fraîche) ou un nombre de sauts réduit. Finalement, le nœud source utilisera le meilleur (le plus rapide) chemin [31].

Le nœud source initialise un délai d'attente appelé *RREP_WAIT_TIME* quand il diffuse une requête. Dans le cas où la destination ne serait pas accessible, aucune réponse ne sera reçue par le nœud source malgré l'expiration du délai ; dans ce cas il relance une nouvelle opération de découverte. De plus, afin de ne pas surcharger le réseau par des messages de diffusions pour un nœud inaccessible, AODV définit un nombre d'essais limité appelé *RREQ_RETRIES*. Si le nombre de découvertes atteint ce nombre sans recevoir aucune réponse, le nœud source considère cette destination comme inaccessible et arrête la découverte pour ce nœud pendant un temps défini. La Figure 7 illustre le processus de découverte par inondation du protocole AODV.

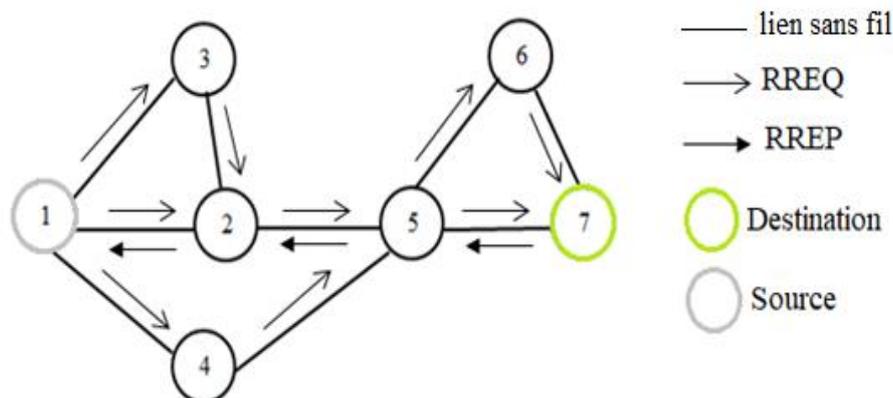


Figure 7. Processus de découverte du chemin du protocole AODV

Processus de maintenance : Dans AODV chaque nœud maintient la liste des voisins par l'échange périodique des messages *Hello* afin de lui permettre d'assurer la connectivité et détecter la coupure d'un lien. Si un nœud ne reçoit aucun message *Hello* d'un voisin après un intervalle de temps pour un chemin actif (AODV utilise un paramètre appelé *allowed_hello_loss* qui représente le nombre des messages *Hello* consécutifs perdus afin d'annoncer que ce lien devient invalide), ce lien sera considéré comme un lien perdu. Durant la transmission de données, si un nœud intermédiaire détecte une coupure, il supprime les chemins actifs qui utilisent le lien coupé. Ensuite, il transmet un message d'erreur (*RERR*) vers la source contenant ce lien pour lui notifier que la destination devient inaccessible. Ce message sera transmis via le chemin inverse à travers les nœuds intermédiaires afin d'atteindre le nœud source. Une fois que le nœud source reçoit le message d'erreur, elle supprime le chemin concerné et relance le processus de découverte.

AODV comme la majorité des protocoles réactifs tels que DSR, génère un flux de contrôle important lors de l'opération de découverte et même dans le cas de maintenance en raison des ruptures des chemins. En effet, dans un scénario de forte mobilité, la découverte sera effectuée très fréquemment ce qui provoque une surconsommation des ressources du réseau.

II.1.3. Protocole hybride

Un protocole hybride est la combinaison des deux protocoles, proactif et réactif en exploitant les avantages de ces deux classes. Il s'adapte de plus en plus pour les grands réseaux (mise à l'échelle)[3]. Le principe fondamental d'un protocole hybride est d'organiser le réseau en zones, dont il applique le routage proactif à l'intérieur de chaque zone (communication immédiate) et le routage réactif à l'extérieur de la zone (communication à la demande) :

- Intra zone : quand un nœud veut communiquer avec un autre nœud qui se situe dans la même zone, un routage proactif sera utilisé (localement) afin de minimiser les coûts (volume du flux constant et la taille de table de routage).
- Inter zone : quand un nœud veut communiquer avec un autre nœud qui se situe hors la zone locale, un routage réactif sera utilisé afin de limiter la diffusion massive de messages de contrôle lors de la découverte des chemins.

Nous décrivons dans ce qui suit le protocole ZRP.

II.1.3.1. **Le protocole ZRP**

Le protocole ZRP (Zone Routing Protocol) [36], est un protocole hybride permettant de découper le réseau en plusieurs zones (appelé zone de routage). Une zone sera créée autour de chaque nœud indépendamment des autres dont la zone est exprimée par l'ensemble des nœuds qui se trouvent dans un rayon prédéfini. Dans ZRP, le rayon représente le nombre de sauts (ZRP définit la valeur à deux sauts) et pas en matière de distance. Un routage proactif est utilisé à l'intérieur de la zone (intra-zone) ce qui créera une topologie locale de la zone au niveau du nœud. Un protocole réactif est utilisé si le nœud source veut communiquer avec un nœud qui ne se situe pas dans sa zone (inter-zone) [36].

Les nœuds d'une zone sont divisés en deux classes : des nœuds internes (ordinaires) et des nœuds périphériques. Les nœuds périphériques sont l'ensemble des nœuds qui se trouve exactement à une distance égale au rayon (à deux sauts). La Figure 8 décrit le concept de zone.

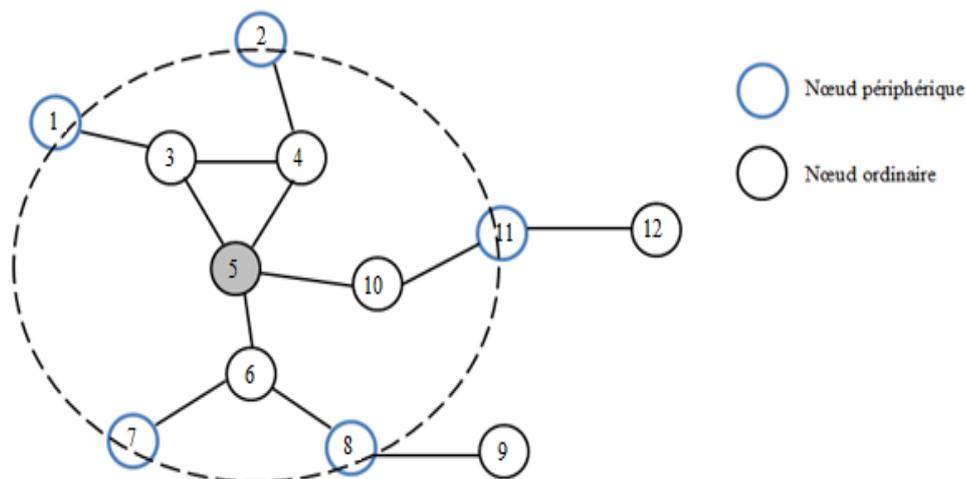


Figure 8. Concept de zone du protocole ZRP

Si un nœud veut communiquer avec un autre nœud qui se trouve dans sa zone, il établit directement la transmission vu qu'il possède déjà un chemin vers ce nœud. Sinon, il déclenche la découverte du chemin par la diffusion d'une requête. Quand un nœud reçoit ce message, si le nœud de destination se trouve dans sa zone où il est la destination, le nœud répond au nœud source; sinon il retransmet la requête vers les nœuds périphériques seulement. Cela réduira le nombre de messages de requête diffusés dans le réseau.

Le protocole ZRP s'adapte plus pour le passage à l'échelle. La performance du protocole ZRP dépend de la valeur de rayon choisi ; pour une valeur très petite, il deviendra un routage totalement réactif.

A la fin nous présentons ci-dessous une étude comparative entre les trois catégories ([10],[37]) :

Type	Proactif	Réactif	Hybride
Disponibilité du chemin	Au préalable	A la demande	Intra-zone : Au préalable Inter-zone : A la demande
Délai	Très faible	Elevé	Intra-zone : Faible Inter-zone : Elevé
Overhead (flux de Contrôle)	Elevé	Faible	Moyen
Echange périodique	Oui, toujours	A la demande	Oui, localement seulement
Nécessite stockage	Important	Faible	Moyen
Bande passante	Elevé	Faible	Moyen
Passage à l'échelle	Non	Partiellement (limité)	Oui

Tableau 1. Tableau comparatif proatif vs réactif vs hybride

II.1.4. Basé sur la structure du réseau

II.1.4.1. Protocole plat

Les protocoles plats sont des protocoles dont les nœuds sont de mêmes niveaux et ont le même rôle (nœuds ordinaires). Nous pouvons dire que la majorité des protocoles proactifs et réactifs sont de type plat ; par exemple : DSDV, OLSR, DSR, AODV sont des protocoles qui utilisent une structure plate.

II.1.4.2. Protocole hiérarchique

Contrairement au routage à plat, le routage hiérarchique comme son nom l'indique est un routage multi-niveaux, dont les nœuds d'un réseau n'ont pas le même rôle ou la même fonction. Les nœuds dans ce type de routage sont organisés en groupes (appelés clusters) qui sont géographiquement proches, dont chaque groupe comporte un responsable du groupe (cluster-head) qui coordonne toutes les communications de son groupe [35]. Les nœuds qui ne sont pas des responsables de groupes représentent le premier niveau et les chefs de groupe représentent le deuxième niveau (niveau supérieur). Nous décrivons les concepts principaux [38]:

- Clustering : C'est la technique utilisée pour diviser le réseau en un ensemble des groupes (clusters) selon certains critères tels que la mobilité, l'énergie, etc. Chaque groupe élit un chef de groupe (cluster-head) qui gère la communication dans son groupe ainsi qu'avec les autres groupes.
- Cluster : Un ensemble de nœuds formant un groupe. La distance du groupe peut être à un seul saut (one-hop cluster) ou multi sauts (k-hops) dont la distance de n'importe quel nœud de ce groupe vers le chef de groupe ne doit pas dépasser ce nombre (en matière de nombre de sauts).
- Cluster-head : c'est le chef de groupe. Il gère la communication à l'intérieur du groupe (intra-cluster) ainsi qu'avec les autres groupes passant par des nœuds passerelles (inter-cluster). Il est responsable de plusieurs tâches telles que le routage, maintenance de group, etc.
- Cluster-gateway : représente la passerelle. C'est un nœud qui se trouve dans le bord d'un groupe et joue le rôle d'un nœud commun qui assure la communication entre deux chefs de groupes ou plus.

L'utilisation d'un routage hiérarchique permet de résoudre le problème de scalabilité en découpant le réseau en groupes pour faciliter la manipulation et réduire le flux de contrôle. Cependant, le changement fréquent du chef de groupe affecte considérablement la performance des réseaux à cause de la perte des informations de routage.

Nous décrivons dans ce qui suit un protocole de cette catégorie qui est CBRP (Cluster Based Routing Protocol).

II.1.4.2.a. Le protocole CBRP

Le protocole CBRP (Cluster Based Routing Protocol) [39] est un protocole hiérarchique en se basant sur le concept de cluster. Il utilise l'algorithme de clustering LLC (Least Cluster

Change) qui permet de choisir le nœud qui a l'identifiant le plus petit comme un chef de groupe. Les chefs de groupe peuvent communiquer entre eux en passant par des nœuds passerelles. La distance du cluster dans CBRP est à deux sauts.

Chaque nœud diffuse périodiquement un message *Hello* contenant deux tables : la table des voisins et la table des clusters adjacents (appelé Cluster Adjacent Table), ce que permettra à chaque nœud de maintenir une vue sur la topologie à deux sauts de lui-même. Basant sur les informations collectées, un rôle sera attribué à ces nœuds (le chef de groupe, la passerelle et le nœud ordinaire). Chaque nœud connaît la topologie jusqu'à deux sauts, le chemin vers n'importe quel nœud (les nœuds de même cluster) de cette distance est disponible immédiatement. Le protocole CBRP utilise un concept réactif similaire que DSR (routage par source dont le chemin complet sera inséré dans l'entête de message) par l'inondation d'un message de requête qui sera rediffusé jusqu'au nœud de destination, notant que seulement les chefs des groupes peuvent broadcaster les requêtes. Quand un nœud passerelle reçoit le message, il le retransmettra en unicast vers le chef de groupe passant par un nœud passerelle.

Le protocole CBRP permet initialement de former les clusters dans le réseau. Il utilise un algorithme simple de clustering dont le nœud ayant le plus petit identifiant sera élu comme un chef de groupe. Les clusters sont formés en se basant sur les informations reçues par l'échange des messages *Hello*. Ensuite, chaque cluster découvre tous ses clusters adjacents liés de manière bidirectionnelle (si un cluster *X* a un nœud voisin à un autre nœud qui appartient à un autre cluster *Y*). Donc, chaque nœud maintient une table d'adjacente de cluster. La Figure 9 illustre un exemple de clustering du protocole CBRP.

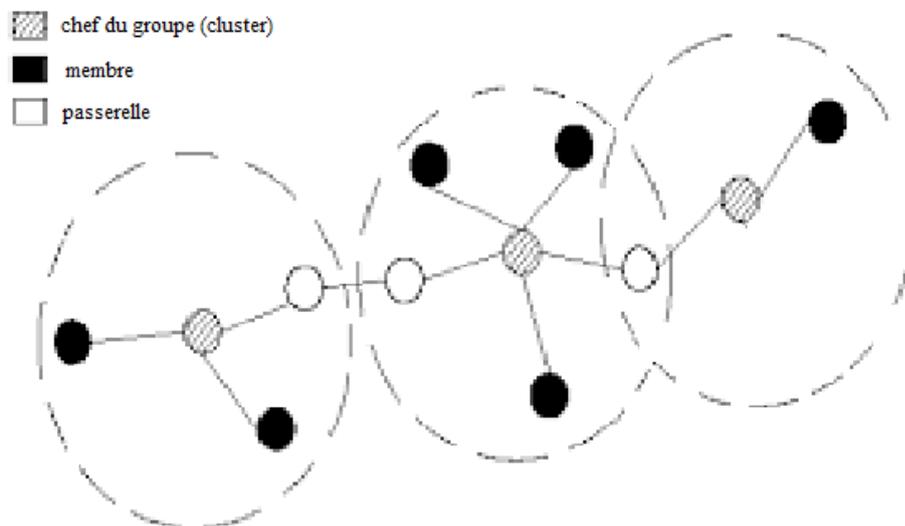


Figure 9. Un exemple de clustering du protocole CBRP

Durant le processus de découverte, si un nœud source veut communiquer avec un nœud de destination (le nœud source ne connaît pas le chemin vers le nœud de destination), il diffuse un message de requête (RREQ). À la réception de la requête, nous décrivons dans la Figure 10 les cas possibles du traitement effectué par chaque type de nœud.

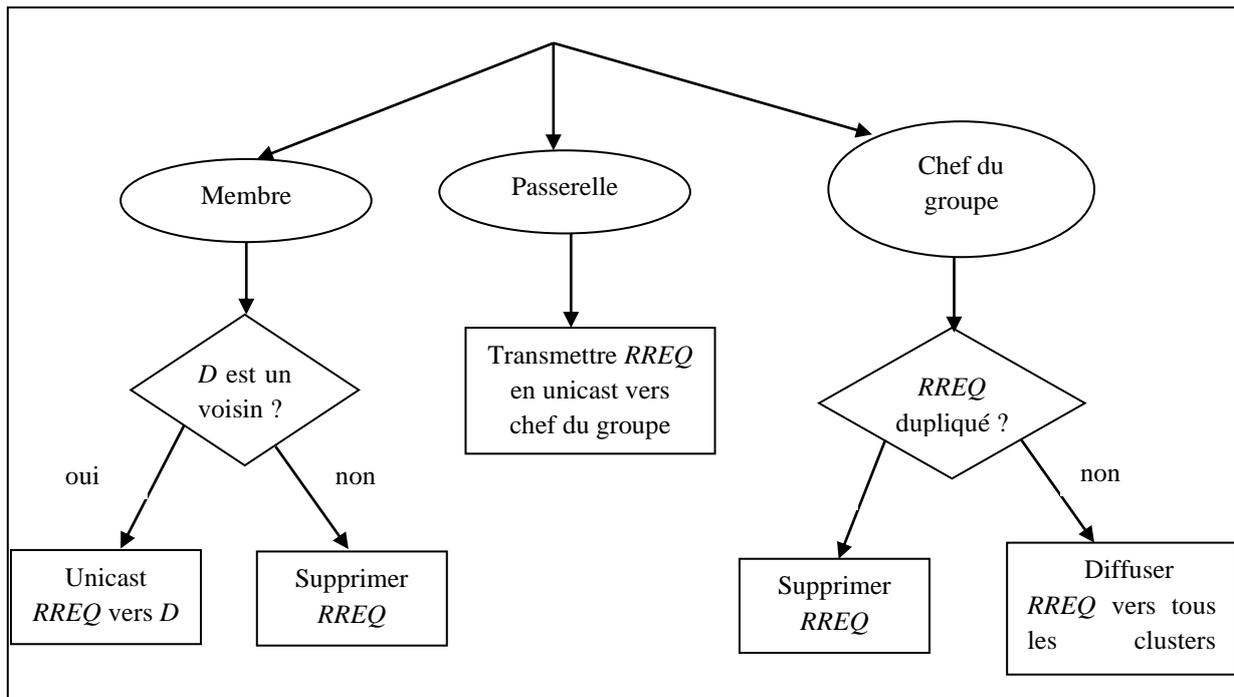


Figure 10. Le processus de découverte du protocole CBRP

Chaque chef de groupe ajoute son adresse dans le message de requête. Finalement, le nœud de destination reçoit le message de *RREQ* contenant le chemin complet ; il répond par un message de réponse *RREP* vers le nœud de destination passant par le chemin inverse.

Le protocole CBRP utilise un champ nommé « *flag* » dans l'en-tête du message *RREP* qui est utilisé pour informer le nœud source qu'il y a un changement sur le chemin. Si une coupure d'un lien est détectée, le nœud qui a détecté cette coupure génère un message d'erreur et le transmet vers le nœud source. Ensuite, il essaie à établir une réparation locale en exploitant la topologie à deux sauts enregistrés (parce que le nœud voisin perdu (à un seul saut) peut être rejoint (en deux sauts) à travers un autre nœud intermédiaire. Si la réparation est réussie, le nœud rétablit la transmission et modifie le champ *flag* par la valeur de 1 (i.e. réparation réussite). Une fois que le nœud de destination reçoit un paquet avec *flag* égal à 1, il transmettra un message *RREP* vers le nœud source (avec *flag* = 1) afin d'empêcher que le nœud source lance une nouvelle découverte vue qu'il a reçu un message d'erreur.

Le protocole CBRP réduit le flux de contrôle diffusé dans le réseau en limitant la diffusion du message de requête aux seulement les chefs de groupe. Cependant, la méthode de construction des clusters et de la sélection des chefs de groupe basant sur l'identifiant n'est pas optimale et peut produire des reconstructions fréquentes des clusters (taux de calcul élevé).

II.2. Routage multi chemins

Comme nous avons vu précédemment, plusieurs protocoles de routages à chemin unique ont été proposés pour trouver un chemin entre le nœud source et le nœud de destination afin d'assurer un bon acheminement de données dans un réseau ad hoc. À cause des caractéristiques du réseau MANET (topologie dynamique, contrainte d'énergie et bande passante, etc.), les liens peuvent être rompus d'une manière fréquente ce qui conduit à une

nouvelle opération de découverte du chemin. De plus, il n'assure aucun équilibrage de charge dès que certains nœuds peuvent être impliqués dans le routage plus que d'autres, provoquant une congestion de certains liens et épuisement rapide l'énergie de ces nœuds. Dans ce contexte, le concept de routage multi chemins est apparu permettant de trouver plusieurs chemins.

II.2.1. Concept de routage multi chemins

Un routage multi chemins est une technique permettant de trouver non pas un chemin unique entre une source et une destination, mais plusieurs chemins en offrant multiples choix au nœud source pour choisir le meilleur chemin possible. Ces chemins peuvent être utilisés soit simultanément en partageant les paquets sur les chemins trouvés en même temps (en parallèle), ou alternativement ([3],[5]), ou même d'utiliser un chemin unique (le chemin optimal) pour transmettre les données ; les autres chemins seront considérés comme des solutions de secours. Le routage multi chemins offre plusieurs avantages ([5],[25]):

- **La fiabilité** : c'est la probabilité qu'un paquet transmis puisse atteindre sa destination. Il est un enjeu important dans les réseaux ad hoc qui doit être assuré par les protocoles de routages parce que les paquets peuvent être perdus. L'objectif principal de routage multi chemins est d'améliorer la fiabilité et de fournir un équilibrage de charge. Le routage multi chemins répond aux problèmes de perte de données par deux approches : transmettre une copie de même paquet dans chaque chemin disponible (rarement utilisé afin de conserver les ressources de réseau) ou de partager les paquets sur ces chemins, cela signifie qu'en cas de coupure, seulement les paquets transmis à travers ce chemin sont perdus.
- **Répartition de la charge** : (appelé aussi load-balancing) l'équilibrage de la charge a une grande importance dans le réseau ad hoc. En utilisant un routage multi chemins, le flux de transmission sera réparti sur plusieurs chemins disponibles conduisant à réduire la congestion, augmente la bande passante (offrir une bande passante agrégée par l'utilisation des chemins multiples simultanément) et offre une meilleure utilisation des ressources (comme l'énergie).
- **Tolérance aux fautes** : Un routage multi chemins permet de réduire les conséquences de la coupure des chemins. En cas de détection d'une coupure, le nœud source possède déjà d'autres chemins vers la destination ; donc au lieu de déclencher une découverte (le cas dans un routage à chemin unique), il utilise un chemin alternatif existant. Cela permet d'éviter une latence (délai pour recevoir une réponse durant la nouvelle découverte) et réduire le flux des messages de contrôle.
- **Réduire le flux de contrôle** : parmi les avantages de routage multi chemins qu'il ne génère aucun coût supplémentaire en matière de messages de contrôle. Il permet d'exploiter la même opération de découverte pour trouver plusieurs chemins entre une source et une destination. De plus, en cas de perte d'un chemin, il utilise un chemin alternatif. Cela va réduire considérablement le nombre de redécouvertes, ainsi minimise le flux de contrôle.

Le routage multi chemins se base sur trois processus [25]:

- La découverte des chemins : c'est le processus de recherche des chemins multiples.
- La maintenance des chemins : c'est le processus de réparation des chemins qui tombent en panne.
- L'allocation du trafic : c'est la stratégie qui détermine la façon de répartir les paquets de données sur les chemins disponibles.

II.2.2. Type des chemins multiples

Il existe trois approches pour construire des chemins multiples dans un réseau en évitant les boucles de routage et en assurant l'indépendance des chemins (pour qu'une coupure d'un chemin n'inflige pas d'autres chemins):

- Nœud disjoint : appelé aussi chemin totalement disjoint. Il correspond aux chemins qui n'ont aucun nœud intermédiaire ou lien commun.
- Lien disjoint : correspond aux chemins qui n'ont aucun lien commun (un nœud peut participer à plus qu'un chemin).
- Lien partiellement disjoint : certains chemins peuvent partager quelques nœuds ou liens.
- Zone disjoint : comprend des chemins où un nœud intermédiaire dans un chemin n'est pas un nœud voisin d'un nœud intermédiaire dans un autre chemin

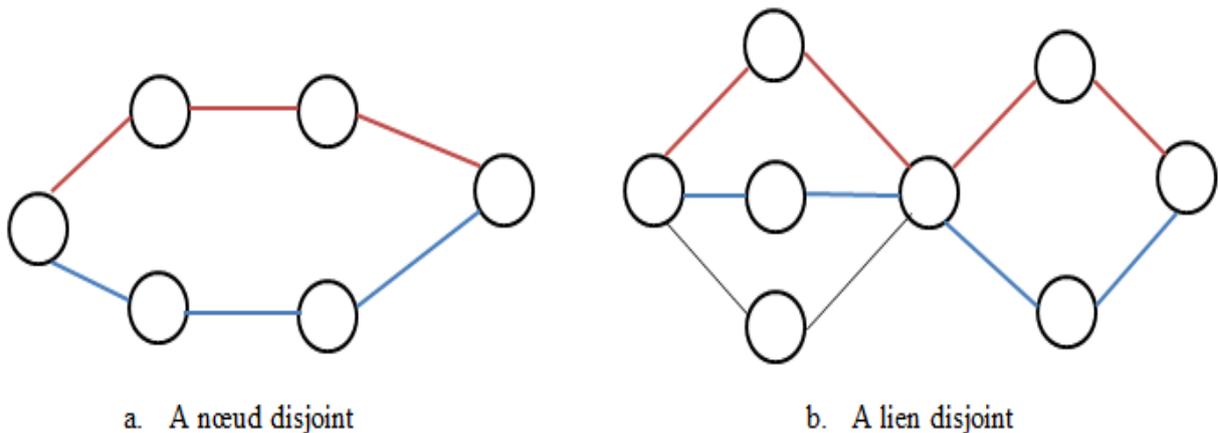


Figure 11. Type des chemins multiples

Le choix de type a un impact sur la performance du réseau. Les chemins à nœuds disjoints offrent une meilleure fiabilité que les autres types, parce que les nœuds sont totalement disjoints ; donc la coupure d'un chemin (suite à la perte d'un lien ou la défaillance d'un nœud) n'affecte pas les autres chemins qui peuvent être utilisés après. Mais, le nombre des chemins trouvés est plus petit, et peut devenir un chemin unique dans les réseaux à faible ou moyenne densité. Le deuxième type à lien disjoint dont les chemins partagent certains nœuds, mais pas les liens qui sont indépendants. La coupure d'un lien aussi n'affecte pas les autres chemins, mais la défaillance d'un nœud peut conduire à la perte de plusieurs chemins. La majorité des travaux existants utilise l'un des deux types (à nœud disjoint ou à lien disjoint) vu que les chemins disjoints augmentent la bande passante et minimisent la probabilité des pertes de données.

II.2.3. Protocoles de routages multi chemins

Dans le cadre de la mise en place du concept multi chemins pour le routage dans les réseaux ad hoc, plusieurs protocoles ont été proposés en intégrant le routage multi chemins. La majorité de ces protocoles présente des extensions portant des améliorations de fonctionnement des protocoles de routages existants comme : AODV, OLSR et DSR. Nous présenterons dans cette partie quelques protocoles de routage multi chemins tel que AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector)[18], MP-OLSR (Multipath Optimized Link State Routing)[40] et MSR (Multipath Source Routing)[41].

II.2.3.1. Le protocole AOMDV

Le protocole AOMDV [18](Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector) est un protocole réactif basé sur AODV permettant de trouver plusieurs chemins à lien disjoint. En regardant la nature des réseaux ad hoc, la topologie du réseau change avec le temps à cause de la mobilité des nœuds et certains chemins seront perdus. Dans ce cas, le protocole AODV doit relancer une découverte afin de trouver un chemin pour rétablir la communication. L'objectif du protocole AOMDV est de fournir une tolérance aux fautes efficace en répondant rapidement aux coupures détectées en rétablissant la transmission sans avoir besoin de déclencher une nouvelle découverte. Il repose sur le même concept d'AODV (processus de découverte et de maintenance) avec certaines améliorations afin d'intégrer le concept de routage multi chemins en garantissant des chemins sans boucle et à lien disjoint. Le protocole AOMDV permet de trouver durant la même opération de découverte des chemins multiples à lien disjoint et sans boucle entre une source et une destination, mais il n'utilise que le meilleur chemin (en matière de nombre de sauts) jusqu'à devenir invalide suite à une coupure ; dans ce cas, un chemin parmi les chemins disponibles sera exploité et utilisé pour rétablir la communication. Une nouvelle opération de découverte est requise seulement si tous les chemins trouvés deviennent invalides.

Processus de découverte multi chemins : Le fonctionnement du protocole AOMDV est similaire que le protocole AODV, il garde les mêmes règles d'AODV avec des modifications qui ont été mises en place pour la structure de table de routage et message de contrôle pour s'adapter au concept multi chemins à lien disjoint. Une nouvelle notion a été utilisée dans la table de routage d'AOMDV pour maintenir des chemins sans boucle nommée « *advertisedhopcount* » c'est le nombre de sauts maximum d'un nœud vers une destination pour les chemins disponibles. Un chemin alternatif n'est accepté que si et seulement si le nombre de sauts de ce chemin est inférieur ou égal à celui de « *advertisedhopcount* ». De plus, un nouveau champ nommé *first hop* est utilisé pour le message de contrôle *RREQ* (représente le premier voisin du nœud source qui a acheminé le paquet) afin d'assurer un chemin à lien disjoint et sans boucle. Les nœuds intermédiaires maintiennent une liste de *FirstHop* contenant l'ensemble des nœuds voisins du nœud source à partir desquels une *RREQ* a été reçue. La Figure 12 présente la structure de la table de routage du protocole AOMDV.

Destination
Sequencenumber
Advertisedhopcount
Route list {(nexthop1, hopcount1,); (nexthop2, hopcount2,);}
Expiration time

Figure 12. La structure de la table de routage du protocole AOMDV

Le processus de découverte du chemin est lancé si le nœud n'a aucun chemin disponible vers le nœud de destination par la diffusion d'un message *RREQ*. Les nœuds à un saut (les voisins) qui ont reçu le *RREQ* ajoutent leur adresse dans le champ *FirstHop*.

Contrairement au protocole AODV qui ignore les *RREQs* dupliqués au niveau des nœuds intermédiaires, le protocole AOMDV ne supprime pas immédiatement les messages de *RREQ* dupliqués parce que chaque *RREQ* reçu d'un nœud différent peut définir un nouveau chemin (à lien disjoint) vers le nœud source. Chaque nœud intermédiaire maintient la liste de *FirstHop* pour chaque *RREQ* afin de garantir que le chemin est à lien disjoint. Il vérifie si le nœud (*FirstHop*) du message *RREQ* reçu n'est pas encore utilisé pour cette requête (il le compare avec la liste *FirstHop* enregistrée au niveau de ce nœud) ; si le cas, alors le nœud intermédiaire enregistre *FirstHop* dans la liste des *FirstHop* et ajoute ensuite le chemin inverse vers le nœud source dans la table de routage. Chaque nœud intermédiaire diffuse seulement une seule copie de *RREQ*, mais il traite tous les *RREQs* reçus. Il vérifie toujours dès la réception d'un message *RREQ* s'il possède un chemin vers la destination, si oui alors il répond directement par un message *RREP*. La destination répond à un nombre déterminé *K* des *RREQs* qui parvient à travers des nœuds uniques dont chacune définit un chemin à lien disjoint (i.e. un message de *RREP* sera transmis pour chaque nœud unique). Les messages de *RREPs* passent par les chemins inverses afin d'atteindre le nœud source. A chaque passage dans les nœuds intermédiaires, le chemin vers la destination est ajouté dans la table de routage.

Une fois le nœud source reçoit le premier *RREP*, il attend un certain temps *RREP_WAIT_TIME* pour collecter d'autres messages *RREP*. Dès que ce temps expire, le nœud source choisit le chemin ayant un nombre de sauts minimal pour transmettre les données.

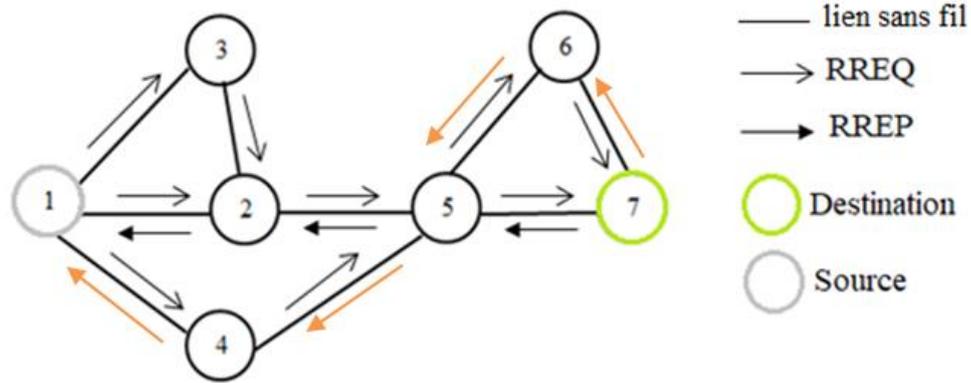


Figure 13. Exemple de processus de découverte du protocole AOMDV

La Figure 13 montre un exemple qui décrit le fonctionnement du processus de découverte du protocole AOMDV. Dans cet exemple, le nœud source a découvert deux chemins à lien disjoints vers le nœud de destination. Le nœud source après l’expiration du temps d’attente, il choisit le plus court chemin en matière de nombre de sauts (le chemin qui passe par le nœud numéro 2).

Algorithme 1. Algorithme de mise à jour des chemins du AOMDV

```

if ( $SeqN_i^d > SeqN_j^d$ ) then
     $SeqN_i^d SeqN^S = SeqN_j^d$ 
    if ( $i \neq d$ )
        advertised_hopid = infinite
        route_listid = NULL
        insert ( $j$ , advertised_hopjd+1) into route_listid
    else
        advertised_hopid = 0
    endif
else if ( $SeqN_i^d = SeqN_j^d$ ) and ((advertised_hopid ,i) > (advertised_hopjd ,j))
    insert ( $j$ , advertised_hopjd+1) into route_listid
endif
    
```

Processus de maintenance : Si un nœud qui appartient à un chemin actif détecte une coupure avec le nœud suivant, il supprime le lien et incrémente le numéro de séquence. Ensuite, il identifie tous les nœuds qui deviennent inaccessibles à cause de cette coupure, il génère un message d’erreur *RERR* qui contient la liste des nœuds inaccessible avec leur nouveau numéro de séquence. Le message *RERR* sera transmis vers les nœuds précédents qui utilisent ce lien. Chaque nœud qui reçoit ce type de message vérifie aussi s’il y a d’autres nœuds qui deviennent inaccessibles et les ajoutant dans le message, ce message et retransmit jusqu’au nœud source. Quand le nœud source reçoit un message *RERR*, elle supprime les chemins associés et vérifie la table de routage si elle contient un autre chemin valide vers la destination, alors le nœud source reprend la transmission à travers ce chemin, sinon elle lance une nouvelle découverte de chemins.

Le protocole AOMDV présente un avantage important en le comparant avec le protocole AODV. Le principe de découvrir plusieurs chemins minimise significativement le nombre de

redécouvertes des chemins par l'exploitation des chemins alternatifs. Cela améliore les performances du réseau en termes de bande passante et de ressources (telle que l'énergie). Néanmoins, il n'exploite qu'un seul chemin jusqu'il devient inactif. La défaillance d'un nœud peut éliminer plusieurs chemins disponibles vu qu'il utilise le concept des chemins à liens disjoints. De plus, il a un délai d'établissement de la transmission plus élevée (le temps d'achèvement de la découverte ainsi que le temps d'attente des messages *RREQs* et *RREPs*).

II.2.3.2. Le protocole MP-OLSR

Le protocole MP-OLSR [42](Multi Path Optimized Link State Routing) est un protocole multi chemins basé sur le protocole OLSR. Bien qu'OLSR soit un protocole proactif, MP-OLSR est considéré comme un protocole hybride dès qu'il échange les messages de topologie et de *Hello* périodiquement, mais il calcule les chemins à la demande au lieu de les maintenir dans la table de routage. Des adaptations profondes ont été proposées sur OLSR afin de l'adapter à l'aspect multi chemins [42]:

- Modification majeure sur l'algorithme de Dijkstra (un algorithme de Dijkstra multi chemins a été proposé) afin de trouver des chemins multiples et pour s'adapter aux différentes tailles des réseaux (densité des nœuds).
- La notion à la demande est intégrée pour le calcul des chemins.
- MP-OLSR utilise un routage source au lieu de saut par saut.
- Une nouvelle fonction a été implémentée (route recovery) pour s'adapter avec le changement fréquent de la topologie.

Le fonctionnement du protocole MP-OLSR est divisé en deux phases : détection de topologie et calcul des chemins([25],[43]).

Détection de topologie. Permettre au nœud de découvrir les voisins et la topologie de réseau. Afin de détecter la topologie du réseau, MP-OLSR repose sur le même concept que le protocole OLSR. Il utilise l'aspect des MPR pour minimiser la diffusion de messages de contrôle ; il échange périodiquement des messages de *Hello* (pour découvrir les nœuds jusqu'à deux sauts et maintenir les liens avec les nœuds voisins qui seront enregistrés dans la table des voisins) et de message de topologie *TC* à travers des MPRs qui seront diffusés sur tout le réseau afin de permettre à tous les nœuds d'avoir une vue globale du réseau (enregistré dans la table de topologie).

Calcul des chemins. Afin d'éviter des calculs lourds et redondants de la table de routage du protocole OLSR, qui sont invoqués à chaque détection de changement de la topologie ou de voisinage. Les chemins calculés sont enregistrés dans la table de routage. MP-OLSR ne procède au calcul des chemins qu'à la demande (i.e. présence des données à transmettre). MP-OLSR utilise le nombre de sauts comme une métrique d'évaluation des chemins.

Avant de décrire la procédure de calcul des chemins qui se base sur l'algorithme de Dijkstra multi chemins, le réseau est défini comme un graphe non orienté $G(N,e)$ dont N est l'ensemble des nœuds de réseau et e l'ensemble des liens (chaque lien porte un coût noté $c(e)$), avec S et D sont le nœud source et destination respectivement. Algorithme de Dijkstra standard est appliqué dans cet algorithme, il permet de trouver le plus court chemin entre deux nœuds dans un graphe. Il suppose que les chemins sont bidirectionnels.

Le principe fondamental de l'algorithme de calcul des chemins nommé MultiPathDijkstra est de trouver à chaque itération i , le plus court chemin P_i entre le nœud source S et destination D . Le protocole MP-OLSR permet de trouver des chemins à liens disjoints ou à nœud disjoint suivant les spécifications de l'utilisateur (en utilisant deux fonctions du coût). Premièrement, après l'application de l'algorithme de Dijkstra sur le graphe, la fonction *sourceTree_i* est utilisée pour extraire le chemin trouvé. Une fois le chemin trouvé, tous les coûts des liens composant ce chemin seront incrémentés afin d'éviter de trouver un chemin similaire durant la prochaine itération. Deux fonctions sont utilisées pour incrémenter les coûts : f_p qui est utilisé pour incrémenter le coût des liens composant le chemin précédent (pour assurer que les prochains chemins n'incluent pas ces liens, i.e. une convergence vers des chemins multiples à lien disjoint) et f_e qui est utilisé pour incrémenter le coût des liens utilisant les nœuds participants dans le chemin précédent (pour assurer que les prochains chemins ne passent pas par ces nœuds ; i.e. une convergence vers des chemins multiples à nœud disjoint).

L'algorithme pour obtenir les N chemins entre un nœud source S et un nœud de destination D est détaillé dans l'algorithme 2.

Algorithme 2. Algorithme multi chemins de Dijkstra: MultiPathDijkstra(S, D, G, N)

```
Begin
 $c_1 \leftarrow c; G_1 \leftarrow G;$ 
For  $i$  from 1 to  $N$  do
     $sourceTree_i \leftarrow Dijkstra(G_i, S)$   $P_i \leftarrow GetPath(SourceTree_i, D)$ 
    If  $(e \text{ or } Reverse(e) \in P_i)$  then  $c_{i+1}(e) \leftarrow f_p(c_i(e))$ 
    Else If  $(Head(e) \in P_i)$  then  $c_{i+1}(e) \leftarrow f_e(c_i(e))$ 
    else  $c_{i+1}(e) \leftarrow c_i(e)$ 
     $G_{i+1} \leftarrow (V, E, c_{i+1})$ 
    end If
end For
Return  $(P_1, P_2, \dots, P_N)$  ;
End.
```

Le choix des deux fonctions f_p et f_e est laissé ouvert suivant les besoins dont une valeur plus grande de f_e permet de trouver des chemins à nœuds disjoints et f_p pour des chemins à liens disjoints. Notant que le nombre des chemins à nœuds disjoints est faible par rapport aux chemins à liens disjoints, ce qui a un impact sur la performance du protocole, notamment dans les réseaux à faible densité.

Après le calcul des chemins, le choix du chemin est fait exclusivement par le nœud source qui va insérer le chemin choisi dans l'entête des paquets (le protocole MP-OLSR utilise routage à source). Les nœuds intermédiaires extraient l'information de routage (le nœud suivant qu'il va l'acheminer le paquet) à partir de l'entête sans avoir besoin de vérifier la table de routage.

Maintenance et restauration du chemin. Le protocole MP-OLSR n'utilise pas le routage saut par saut qui se base sur la table de routage. Cela nous conduit à quelques problèmes qui provoquent une coupure du chemin :

- Les informations du nœud source peuvent ne pas être assez récentes, car il faut du temps pour inonder les messages de contrôle de topologie sur l'ensemble du réseau. Dans ce cas, le nœud source peut construire un chemin par des liens coupés (le chemin n'est plus valide).
- Le changement fréquent de la topologie produit des coupures de certains liens. Donc, on peut avoir les échecs de transmission.

Pour éviter de telles situations, une fonction « *route recovery* » est mise en place. Chaque nœud intermédiaire doit vérifier si le nœud suivant est parmi leurs voisins avant de transmettre les paquets, sinon, il recalcule le chemin vers la destination en se basant sur les informations de topologie. Le chemin de l'entête du paquet sera mis à jour suivant le chemin trouvé par ce nœud[43].

Le protocole MP-OLSR améliore les performances du réseau en le comparant à OLSR en matière de taux de livraison des données et du délai de bout en bout ; il réduit aussi le taux de calcul (à la demande). Cependant, il occupe toujours une bande passante importante à cause de l'échange périodique des messages *Hello* et de topologie d'une manière permanente même si certains chemins et informations ne seront jamais utilisés.

II.2.3.3. Le protocole MSR

Le protocole MSR (Multipath Source Routing) est une extension multi chemins du protocole de routage DSR (protocole réactif avec routage à source). Il permet de trouver plusieurs chemins entre le nœud source et le nœud de destination. Contrairement au protocole précédent que nous avons vu qu'il utilise le concept de routage multi chemins, mais exploite seulement le plus court chemin jusqu'à ce chemin devient invalide, le protocole MSR utilise tous les chemins trouvés en répartissant la charge des paquets des données sur ces chemins. Il est basé sur deux principes: la recherche des chemins multiples disjoints et la transmission des paquets avec équilibrage de charge.

Recherche des chemins multiples. MSR utilise le même processus de découverte du chemin du protocole DSR qui est capable de trouver plusieurs chemins, mais il choisit seulement le plus court chemin en matière de nombre de sauts. Dans MSR, chaque chemin trouvé durant la phase de découverte est enregistré dans le cache en lui attribuant un identifiant unique. MSR préfère les chemins disjoints afin d'utiliser plusieurs ressources du réseau (différents nœuds et liens). Le protocole MSR n'a pas un problème de boucle de routage puisqu'il repose sur le concept de routage à source où le chemin sera inséré dans l'entête du paquet. Donc toute boucle peut être facilement détectée et éliminée.

La transmission et l'équilibrage de charge. Les nœuds intermédiaires n'ont aucun rôle pour l'acheminement des paquets, le nœud source prend en charge cette tâche en spécifiant le chemin dans l'entête du paquet. De plus, il est le responsable sur l'équilibrage de charge. Pour un équilibrage de charge efficace, MSR utilise le délai comme une métrique d'évaluation pour répartir les paquets sur les chemins disponibles. Afin de surveiller les informations sur les

chemins en temps réel, MSR transmet périodiquement des messages appelés « probs » pour calculer le délai d_k de chaque chemin k . Ces informations seront utilisées pour calculer et attribuer un poids W_k à chaque chemin k dont le chemin qui a un temps de délai faible prend un poids plus élevé suivant la formule suivante :

$$w_k = \min\left(\frac{d_{max}}{d_k}, U\right) \cdot R ; k = 1, \dots, N \quad (1)$$

Où d_{max} représente le délai maximum de tous les chemins trouvés ; U est un seuil pour les poids à ne pas dépasser et R est un facteur pour contrôler la probabilité de permutation entre les chemins.

Les paquets sont distribués sur les chemins suivant les poids attribués W_k afin d'assurer un minimum de délais et éviter la congestion.

Le protocole MSR est un protocole réactif multi chemins qui utilise le routage à la source. Il permet d'assurer une meilleure distribution du flux de données sur les chemins disponibles. Néanmoins, il génère des messages de contrôle supplémentaire à cause des échanges des messages «prob». En plus, il génère un délai important durant la transmission qui devient en quelque sorte des transmissions transitionnelles vu que MSR envoie dans tous les chemins et à chaque intervalle de temps des messages «probs»; durant cette phase, la transmission sera suspendue temporairement jusqu'à la réception d'un accusé de réception.

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit premièrement la classification des protocoles de routages dans les réseaux ad hoc. Il existe plusieurs types de classifications : suivant le mode de fonctionnement et suivant la structure du réseau. Les protocoles de routage peuvent être : proactif (prépare les chemins au préalable), réactif (recherche les chemins à la demande) ou hybride (combine les deux familles : proactif et réactif). Nous avons terminé cette classification par un tableau comparatif global. La deuxième classification est basée sur la structure : plat (tous les nœuds ont le même niveau) et hiérarchique (les nœuds ont des différents niveaux). Pour chaque famille, nous avons cité et décrit le fonctionnement d'un protocole de routage de base tels que DSDV, AODV, CBRP...

Ensuite, nous avons présenté le concept de routage multi chemins en citant certains avantages tels que la fiabilité et la répartition du flux. Le routage multi chemins comporte la notion de disjonction (l'indépendance entre les chemins) dont les chemins peuvent être : à lien disjoint, à nœud disjoint et partiellement disjoint.

Tous les protocoles présentés dans ce chapitre utilisent le nombre de sauts (hop count) comme une contrainte pour évaluer les chemins. En connaissant les caractéristiques des réseaux ad hoc comme l'énergie et la mobilité, le choix basé sur le nombre de sauts n'est pas toujours optimal parce qu'il ne prend aucune considération de ces facteurs importants qui peuvent affecter la performance du réseau. Dans le chapitre suivant, nous discuterons l'aspect de l'énergie et la mobilité dans les réseaux MANETs. Nous étudierons deux contraintes: la stabilité qui se base généralement sur la mobilité des nœuds et l'énergie qui doit être gérée d'une manière efficace afin d'augmenter la durée de vie du réseau.

CHAPITRE III

Routage avec contrainte d'énergie et de stabilité

III.1. Introduction

Le réseau ad hoc est formé d'un ensemble de nœuds mobiles qui ont des capacités limitées (énergie, mémoire, etc.). Le routage dans un tel réseau est un véritable challenge afin d'assurer une transmission fiable et d'augmenter la durée de vie du réseau le plus possible. Certains protocoles de routage cités dans le chapitre précédent utilisent le nombre de sauts comme une contrainte pour évaluer les chemins et choisir le plus court chemin. Ce choix n'est pas toujours le choix optimal, parce qu'il peut être composé d'un ou plusieurs nœuds ayant une faible énergie ; alors ces nœuds vont épuiser rapidement leur capacité énergétique restante et deviennent défaillants, ce qui provoque d'un côté une interruption de la communication et d'un autre côté, la réduction du nombre de nœuds (conduisant à un partitionnement du réseau dont certaines zones peuvent devenir totalement isolées). En effet, la contrainte d'énergie représente un facteur critique dans le réseau ad hoc à cause de l'énergie limitée (batterie) des nœuds qui sera consommée durant le fonctionnement du réseau par la participation dans l'échange des messages et aussi par les opérations de calcul. Une gestion d'énergie efficace réduit la consommation d'énergie et augmente la durée de vie du réseau.

Un autre facteur fondamental est la stabilité. La mobilité des nœuds produit un changement fréquent de la topologie du réseau dont certains liens seront rompus et d'autres seront créés. La perte d'un lien dans un chemin actif a un impact considérable sur la performance du réseau; d'un côté il augmente le taux de perte des paquets avec une génération de flux de contrôle pour la découverte d'un chemin alternatif occupant une bande passante importante; d'un autre côté une surconsommation de l'énergie à cause des opérations générées. Donc, le chemin doit être composé par des nœuds stables afin d'assurer une communication fiable en évitant les coupures causées par la perte des liens et conserver les ressources du réseau.

Dans ce chapitre, nous allons présenter deux contraintes : l'énergie et la stabilité. Nous commençons par une étude sur la contrainte de l'énergie en décrivant le principe de consommation de l'énergie et les sources de sa perte dans le réseau ad hoc, en présentant aussi les différentes approches pour sa conservation. De plus, nous discutons quelques protocoles qui se basent sur la contrainte d'énergie. Ensuite, nous présentons la deuxième contrainte : la stabilité en décrivant la classification des protocoles basés sur la stabilité ainsi que les différents modèles de mobilité. Finalement, nous allons décrire quelques protocoles de routage qui combinent les deux contraintes.

III.2. La consommation de l'énergie dans un réseau ad hoc

La contrainte de l'énergie est considérée comme un facteur critique dans le réseau ad hoc. Les nœuds dans ce réseau sont équipés par une source limitée d'énergie qui est la batterie.

Regardant l'aspect de mobilité des nœuds, il est difficile de recharger ou remplacer la batterie d'un nœud. Chaque nœud consomme une quantité d'énergie pour exécuter certaines opérations basées sur les calculs telles que l'affichage, les opérations de calcul et de stockage, ainsi que les opérations de communication de l'interface sans fil par la transmission et la réception des messages [44]. On peut résumer les sources de consommation dans un réseau ad hoc comme suit [24]:

- La transmission sans fil : par l'échange des messages qui représente la source de consommations la plus élevée pour un réseau ad hoc. Généralement, la transmission du paquet consomme plus d'énergie que la réception. La valeur de consommation change suivant le type d'interface.
- Gestion du terminal : le nœud possède plusieurs composants qui consomment l'énergie comme le CPU, l'écran d'affichage, la mémoire...
- Fonctionnalités du réseau : chargé par le protocole de routage qui assure les liaisons par échange des messages de contrôle.

Si un nœud épuise totalement son énergie résiduelle (nœud mort), il quitte immédiatement le réseau. La défaillance d'un nœud n'affecte pas seulement le nœud lui-même, mais aussi tout le réseau et la transmission des données, puisque le réseau ad hoc est un réseau multi sauts dont l'acheminement des paquets est assuré par la participation de plusieurs nœuds intermédiaires. Donc, les protocoles de routage doivent prendre en compte la contrainte d'énergie en fournissant une bonne gestion d'énergie afin d'augmenter la durée de vie du réseau.

III.2.1. Mode d'opération dans un réseau ad hoc

La consommation d'énergie dans un réseau ad hoc peut être divisée en quatre modes comme il est illustré dans la Figure 14 ([3], [45], [46]):

- **Le mode transmission** : correspond à l'état de transmission du paquet. C'est le mode qui consomme plus d'énergie.
- **Le mode réception** : correspond à l'état de réception du paquet
- **Le mode veille (Sleep)** : correspond à l'état en écoute (attendre la transmission ou la réception du paquet). Aucune communication n'est active dans ce cas, mais le nœud reste toujours en écoute permanente pour détecter le signal et recevoir les paquets transmis par les nœuds voisins. Le nœud consomme aussi l'énergie dans cet état vu que le nœud a besoin de se mettre en écoute.
- **Le mode inactif (idle)**: correspond à l'état où l'interface sans fil est atteinte, permettant au nœud de s'arrêter pendant un certain temps. La consommation d'énergie dans ce mode est très faible, mais le nœud ne peut pas recevoir ni détecter un paquet.

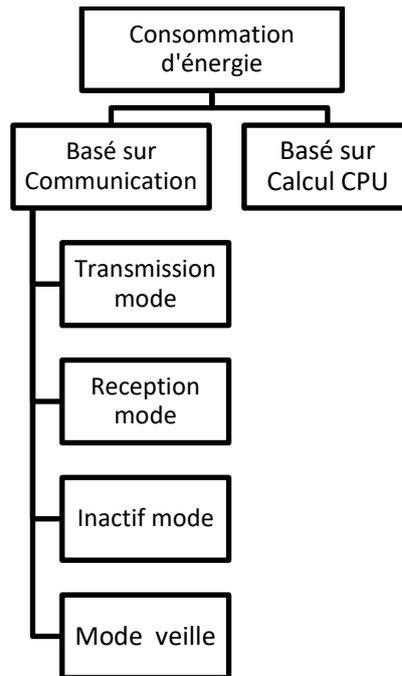


Figure 14. Mode de consommation d'énergie

Le taux de consommation d'énergie ne dépend pas seulement de mode du nœud, mais aussi du type de matériel (fabricant de l'interface sans fil). Nous présentons dans la table Table 1 un aperçu de la consommation d'énergie pour quelques types d'interfaces ([3], [5]).

Interface /Consommation (en mW)	Transmission	Réception	Inactif	Veille
Lucent Wave LAN	1400	1200	1000	150
Lucent Bronze Lucent	1300	910	840	66
Cabletron Roamabout	1400	1000	830	130
Aironet PC 4800	2500	900	110	20

Table 1. Tableau de consommation d'énergie par différentes interfaces.

On peut observer dans ce tableau (Table 1) que la consommation d'énergie dans le mode réception et le mode inactif (en écoute) sont presque égaux. De plus, certaines études ([46],[47]) prouvent que la consommation d'énergie en broadcast et en unicast n'est pas la même.

III.2.2. Sources de perte d'énergie

Dans les réseaux ad hoc, l'énergie est consommée par toute opération effectuée par un nœud. Il existe plusieurs sources de pertes d'énergie en communication dans un réseau ad hoc ([5], [45]) :

- Le mode inactif : ce mode gaspille l'énergie sans effectuer aucune tâche utile dans le réseau (le nœud est considéré comme défaillant vu que l'interface sans fil est éteinte).
- Mode veille : l'une des sources majeures de perte est l'écoute permanente du canal pour recevoir les paquets. De plus, le nœud peut recevoir des paquets qui ne lui sont pas destinés.

- Collision : c'est quand un nœud reçoit plus qu'un paquet en même temps, ces paquets sont affectés et ne seront pas correctement reçus (généralement, ils sont rejetés ou retransmis). Une perte d'énergie est observée par la réception et la transmission des paquets erronés non traités.
- Surcoût du protocole de routage (overhead): représente le flux des paquets de contrôle généré par le protocole de routage, il impose une consommation d'énergie supplémentaire par la transmission des différents types de paquets pour assurer la disponibilité des liens et la maintenance.
- Taux d'erreurs : c'est le taux des paquets perdus (reçu avec des bits erronés) causé par plusieurs paramètres (tels que la congestion, le bruit, des problèmes liés à l'interface, etc.). Les paquets erronés ou perdus sont parfois retransmis par le nœud émetteur. Donc, une quantité d'énergie est perdue durant la réception du paquet erroné et la retransmission du paquet de nouveau.

III.2.3. La durée de vie

L'objectif principal d'utiliser la contrainte d'énergie par les protocoles de routage est d'optimiser la durée de vie du réseau vu que les nœuds ont une capacité énergétique limitée. Il existe plusieurs définitions de la notion de durée de vie du réseau :

- C'est la durée jusqu'à ce que le premier nœud soit mort (épuise totalement son énergie) ([48], [49]).
- C'est la durée jusqu'à ce que le nombre des nœuds morts atteigne un seuil (comme la moitié de réseau sera non fonctionnel. i.e. 50% des nœuds sont morts [50]).
- C'est la durée jusqu'à ce que tous les nœuds épuisent leur énergie [5].
- C'est la durée jusqu'à une répartition est apparu dans le réseau (devient des zones isolées) [51].

La définition la plus utilisée par les chercheurs pour évaluer la performance de réseau est la première définition [52].

III.3. Approches de conservation d'énergie dans un réseau ad hoc

Dans les réseaux MANET, la capacité énergétique limitée des nœuds affecte la durabilité du réseau dont le nombre des nœuds sera diminué à cause de l'épuisement d'énergie de certains nœuds. La défaillance d'un ou plusieurs nœuds provoque des coupures de plusieurs liens qui peuvent être une partie des communications actives. Cela augmente le taux de perte des paquets de données. Les protocoles de routage après la détection de coupure essaient de maintenir les chemins en générant un flux de contrôle important. Parfois, la défaillance d'un nœud est critique et introduit une répartition du réseau ce qu'a un grand impact sur la performance du réseau.

À cet effet, les protocoles de routage doivent minimiser la consommation d'énergie afin de maximiser la durée de vie du réseau. Plusieurs approches ont été proposées pour conserver l'énergie des nœuds ; les axes fondamentaux de conservation d'énergie sont : la puissance de transmission, la gestion de mode inactif, l'énergie résiduelle et le temps de vie du réseau.

Nous présentons une classification des différentes approches utilisées dans ce contexte ; voir la Figure 15 [53].

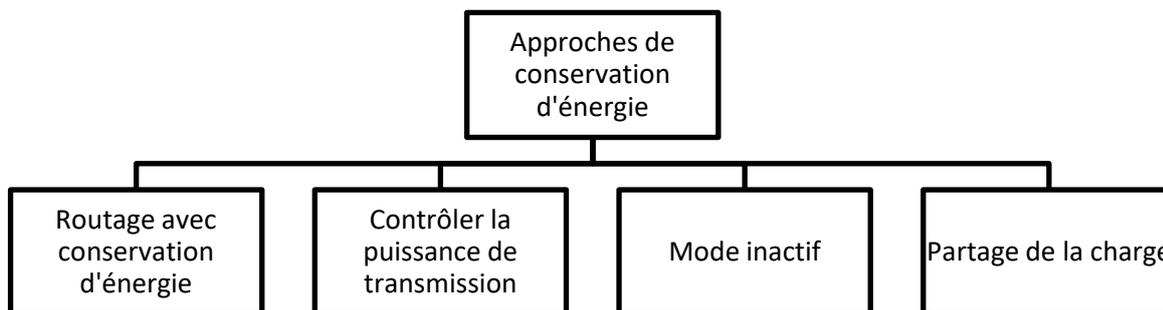


Figure 15. Classification des approches de conservation d'énergie

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à décrire chaque catégorie de ces approches, en discutant quelque travaux connexes pour chaque catégorie.

III.3.1. Routage avec conservation d'énergie

Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à cette catégorie (l'approche la plus utilisée). Il est basé sur la couche réseau dont le protocole de routage prend en charge la contrainte d'énergie pour choisir le meilleur chemin entre une source et une destination. La métrique d'énergie utilisée par les protocoles de routage peut être classifiée en 03 catégories [54]: la puissance de transmission, l'énergie restante et la durée de vie. Les protocoles de routage peuvent utiliser une métrique ou combiner plusieurs métriques.

III.3.1.1. La puissance de transmission

L'objectif de cette technique est de choisir le chemin à travers lequel la consommation d'énergie totale pour délivrer un paquet sera minimisée. Plusieurs travaux ([44], [55]) ont été proposés ; nous décrivons certains protocoles qui utilisent la puissance de transmission comme une contrainte d'évaluation.

Le protocole MTPR (Minimum Total Transmission Power Routing) [44] permet de choisir le chemin ayant la consommation totale d'énergie minimale qui est calculée en se basant sur la puissance de transmission. Le protocole calcule la somme de puissance de transmission des nœuds notés $P(n_i, n_{i+1})$ qui composent un chemin P_i suivant la formule suivante :

$$P_i = \sum_{i=0}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (2)$$

Le chemin qui a une valeur minimale est choisi par le protocole afin de réduire la consommation d'énergie. Cependant, le protocole MTPR permet de sélectionner le chemin qui a le plus grand nombre de sauts ce qui introduit un long temps de bout en bout. De plus, il ignore l'énergie restante dans les nœuds dont le chemin choisi peut contenir un nœud à faible énergie (épuisée). Cela peut conduire à une coupure (à court terme) à cause de la défaillance de ce nœud. La diminution du nombre de nœuds affecte négativement la durée de vie du réseau.

Les auteurs [56] proposent un nouveau protocole de routage réactif nommé PEER (Progressive Energy Efficient Routing), ce protocole se base sur un modèle qui prend en

considération la consommation d'énergie durant le processus de découverte des chemins. Ils ont prouvés que le chemin le plus proche à la ligne directe entre le nœud source et le nœud de destination consomme moins d'énergie. Donc, il essaie de trouver les plus courts chemins ayant le moindre nombre de sauts [52]. Le protocole collecte durant la découverte la somme des puissances de transmission requises pour transmettre le paquet vers le nœud de destination pour chaque chemin trouvé. Ensuite, il choisit le chemin ayant la valeur minimale de consommation d'énergie parmi les chemins trouvés qui ont le nombre de sauts minimal. On peut trouver plus qu'un chemin qui a la même consommation d'énergie ; dans ce cas, le protocole utilise un autre critère tel que le temps d'arriver pour favoriser un chemin. Le protocole PEER recherche progressivement le meilleur chemin (le plus économe en énergie) et le maintien en permanence en se basant sur le processus de maintenance. Il ajuste les nœuds du chemin si nécessaire afin que le chemin soit tout le temps économe en énergie. En effet, chaque nœud doit observer les paquets échangés et la table des voisins ; si un nœud détecte qu'un changement au niveau du chemin actif va réduire la consommation d'énergie (changer un lien, un nœud, etc.), il collabore avec ses voisins afin de mettre à jour la table de routage. Ce protocole comme MTPR néglige totalement l'importance de l'énergie restante des nœuds où le chemin choisi peut comporter un nœud épuisé qui sera défaillant.

III.3.1.2. L'énergie restante

La durée de vie est mesurée sur la base du premier nœud défaillant énergétiquement (l'énergie restante du nœud est totalement épuisée). La technique basée sur la puissance de transmission réduit la consommation d'énergie, mais n'assure pas la durée de vie du réseau. Afin de maximiser la durée de vie du réseau, quelques protocoles de routages ([54], [57], [58], [59]) ont été proposés qui se basent sur le niveau d'énergie restant dans les nœuds.

Le protocole MBCR (Minimum Battery Cost Routing)[54] est un protocole qui calcule la somme d'énergie restante des nœuds $E_i(t)$ composant un chemin j afin de maximiser la durée de vie du réseau, suivant la formule suivante :

$$C_j = \sum_{i=1}^{k-1} f(E_i(t)) \quad , \text{ où } f(E_i(t)) = \frac{1}{E_i(t)} \quad (3)$$

Le chemin j qui a un coût minimal (C_j) est choisi (chemin ayant la capacité énergétique maximale). Le protocole évite les chemins qui ont un niveau énergétique faible (le taux de défaillance est réduit). Néanmoins, le chemin optimal peut comprendre un nœud avec un niveau d'énergie faible.

Un protocole de routage nommé LTAOMDV (Life Time AOMDV) [58] a été proposé basé sur le protocole AOMDV[18] en prenant en considération la contrainte d'énergie. Le protocole LTAOMDV classe le chemin suivant le niveau d'énergie moyenne du chemin en se basant sur l'énergie restante au niveau des nœuds de chaque chemin. Durant la découverte, il calcule la somme d'énergie restante de tous les nœuds (w) composant le chemin entre le nœud source u_0 et le nœud de destination u_k à chaque passage par un nœud intermédiaire. Ensuite, il calcule le coût moyen d'énergie e_{avg} de chaque chemin en exploitant la valeur reçue de la somme énergie e_{sum} divisée par le nombre de sauts k suivant la formule :

$$e_{avg}(P_i(u_0, u_k)) = \frac{e_{sum}(P_i(u_0, u_k))}{k+1} ; \text{ où } e_{sum}(P_i(u_0, u_k)) = \sum_{j=0}^k w(u_j) \quad (4)$$

Le coût de l'énergie résiduel $e_{level}(u_j)$ d'un nœud j est calculé en divisant l'énergie restante $w(u_j)$ sur l'énergie moyenne de tous les nœuds participants dans les chemins trouvés e_{avgNet} :

$$e_{level}(u_j) = \frac{w(u_j)}{e_{avgNet}} \quad (5)$$

Les nœuds sont classifiés en trois classes basant sur le niveau d'énergie restante dans le nœud suivant deux seuils α et β en :

- faible, si $e_{level} < \alpha$
- moyenne, si $\alpha \leq e_{level} < \beta$
- élevée, si $e_{level} > \beta$

Les nœuds ayant un niveau d'énergie faible sont éliminés. Le chemin ayant un niveau d'énergie élevé sera choisi comme un chemin optimal. Le protocole LTAOMDV réduit le nombre des nœuds défaillants et augmente la durée de vie de réseau. Cependant, il ignore la notion de taux de consommation d'énergie dont certains nœuds peuvent avoir un trafic important que d'autres ce qu'épuise leur énergie rapidement.

III.3.1.3. Durée de vie

Les auteurs [60] introduisent une nouvelle métrique : le taux de consommation d'énergie, nommée « Drain Rate » qui mesure le taux de consommation d'énergie d'un nœud dans un intervalle de temps. En se basant sur cette métrique, nous pouvons estimer la durée de vie d'un nœud i suivant l'énergie restante dans ce nœud E_i^r et le drain rate $DR_i(t)$, donnée par la formule suivante :

$$LT_i(t) = \frac{E_i^r(t)}{DR_i(t)} \quad (6)$$

Nous pouvons dire que la métrique de la durée de vie offre des meilleures performances par rapport aux deux premières métriques : la puissance du signal qui permet de choisir le chemin qui consomme moins d'énergie, mais il néglige le niveau d'énergie restant dont le chemin sélectionné qui peut contenir des nœuds à faible énergie ; la deuxième est l'énergie restante qui prend en considération le niveau d'énergie restant du nœud, mais elle ignore le facteur de l'utilisation de ce nœud qui peut participer en plusieurs communications actives; donc, malgré que le chemin optimal se compose des nœuds ayant un niveau d'énergie élevé, mais ces nœuds peuvent épuiser rapidement leur énergie s'il y a un trafic important passe par eux (dans le cas où certains nœuds sont utilisés par plusieurs communications actives).

Le protocole MDR (Minimum Drain Rate)[60] permet de calculer la durée de vie des chemins en matière d'énergie et le volume du trafic courant afin de choisir le meilleur chemin qui a la durée de vie maximale. Dans ce protocole, chaque nœud surveille sa consommation énergétique pendant un intervalle de temps et estime la valeur de « Drain Rate », notée $DR(t)$ en se basant sur la valeur énergétique précédente DR_{old} et la valeur récente DR_{new} :

$$DR_i = \alpha \cdot DR_{old} + (1 - \alpha) \cdot DR_{new} \quad (7)$$

Le meilleur chemin est choisi suivant la formule :

$$C_r = \min(T_i(t)); \text{ where } T_i(t) = \frac{E_i(t)}{DR_i(t)} \quad (8)$$

Le protocole MDR augmente la durée de vie du réseau en choisissant le chemin ayant la valeur maximale de durée de vie et évite les nœuds qui peuvent épuiser leur énergie rapidement en tenant compte du taux de consommation et la valeur d'énergie restante.

III.3.1.4. Métriques combinées

En outre, les protocoles de routage peuvent utiliser plus qu'une seule métrique afin de bénéficier des avantages de ces métriques. Plusieurs protocoles ([61], [62]) ont combinés deux métriques d'énergies afin de maximiser la durée de vie de réseau.

Le protocole de routage EPAR ([62],[63]) (Efficient Power Aware Routing) est un protocole réactif basé sur le protocole DSR avec la contrainte d'énergie en combinant la puissance de transmission et d'énergie restante afin de maximiser la durée de vie des nœuds. EPAR utilise une formulation min-max pour sélectionner le chemin qui a la plus grande capacité énergétique [11] ;i.e. le chemin qui a le niveau d'énergie restante la plus élevée au niveau des nœuds et un total de la puissance de transmission la plus faible pour transmettre le paquet.

Les auteurs [64] proposent une extension du protocole OLSR en intégrant la contrainte d'énergie nommée EE-OLSR (Energy Efficient OLSR). La contribution principale du protocole EE-OLSR est d'impliquer la contrainte d'énergie (l'énergie restante et la durée de vie d'un nœud) pour sélectionner les MPRs en assurant une bonne performance et augmente la durée de vie du réseau. Chaque nœud déclare une valeur heuristique correspondante nommée « Willingness » qui est classifiée en trois classes (faible, moyenne, fort). Cette valeur est utilisée pour sélectionner les nœuds qui peuvent devenir des MPRs [51] . Cette valeur est calculée au niveau de chaque nœud basant sur l'énergie restante et la durée de vie estimée de ce nœud. EE-OLSR propose un autre mécanisme qui peut être utilisé dans le protocole OLSR permettant de réduire l'utilisation du mode veille par les nœuds pour conserver plus d'énergie. Ce mécanisme permet d'atteindre l'interface sans fil des nœuds voisins durant l'échange des messages unicast. Le protocole EE-OLSR a amélioré la performance du réseau. Cependant, il repose sur le même concept du nombre de sauts (comme OLSR) pour la construction des chemins (le plus court chemin en matière de nombre de sauts sera choisi).

III.3.2. Contrôle la puissance de transmission

Le routage avec conservation d'énergie utilise l'une des trois métriques : l'énergie restante, la durée de vie et la puissance de transmission. Les deux premières métriques ne prennent pas en considération la puissance de transmission du chemin (le chemin choisi peut avoir une grande consommation énergétique) ; la troisième métrique est la puissance de transmission dont le protocole essaie de trouver un chemin qui consomme moins d'énergie. Les nœuds transmettent généralement les paquets avec la puissance de transmission maximale ce qui peut introduire une consommation d'énergie importante.

La puissance de transmission est proportionnelle avec la distance entre la source et la destination. Dans cette approche, les chercheurs concentrent de plus en plus sur l'ajustement de la puissance de transmission d'un nœud d'une façon que le paquet aura atteint le nœud suivant (le nœud de destination ou un nœud intermédiaire) avec la puissance de transmission minimale pour conserver l'énergie des nœuds.

Le protocole EAR (Energy Aware Routing) [65] permet de conserver l'énergie des nœuds en variant la puissance de transmission des paquets ; il est basé sur le protocole AODV. L'utilisation d'une puissance maximale permet de réduire le nombre de sauts, mais crée une large zone d'interférence. L'idée de cette solution est d'ajuster la puissance de transmission afin de réduire l'énergie consommée au niveau de chaque nœud. Chaque nœud communique avec les nœuds voisins durant la découverte par la transmission du message *RREQ* avec la puissance maximale. Une fois le nœud de destination est atteint, chaque nœud inclut dans le message sa position afin de permettre au nœud voisin de calculer la distance. Contrairement à l'AODV qui établit le chemin une fois que le nœud source reçoit un message *RREP*, EAR attend un certain temps afin de recevoir plusieurs *RREPs*. Le chemin le plus court en matière de distance est choisi. Chaque nœud dans le chemin choisi utilise une puissance de transmission variante en fonction de la distance avec le nœud suivant en utilisant la fonction de transmission Friis qui calcule la puissance de transmission dans un espace libre (free space). Le protocole EAR réduit la consommation d'énergie, mais il ignore l'énergie restante et la durée de vie des nœuds.

Un autre protocole qui se base sur le contrôle de la puissance de transmission est proposé nommé LOA-AODV (Lion Optimization Algorithm AODV) [66]. L'algorithme d'optimisation de lion (LOA) est intégré dans ce protocole qui est un processus important permettant non seulement la protection de la survie des lions, mais permet également de générer de manière aléatoire une solution initiale. Le protocole LOA-AODV identifie le meilleur chemin qui se dirige vers un lieu protégé en réduisant l'impact de la mobilité pour les nœuds du réseau. Initialement, le nœud source diffuse un message de *RREQ* pour trouver tous les chemins entre le nœud source et destination. Une fois que les chemins initiaux sont trouvés, il applique l'algorithme LOA sur ces chemins. Ensuite, l'algorithme LOA ajuste la puissance de transmission pour tous les nœuds. Le meilleur chemin est sélectionné pour transmettre les paquets de données.

III.3.3. Mode inactif

Une autre approche de conservation d'énergie dans le réseau ad hoc est d'offrir une bonne gestion des deux modes (inactif et veille) afin de réduire l'énergie consommée par les nœuds inutilisés qui restent en mode veille.

SPAN (Spanning Tree) [67] est un protocole proactif qui utilise une technique de conservation d'énergie basée sur le mode inactif sans affecter les connectivités entre les nœuds ou la performance du réseau. Il permet d'observer la zone dans laquelle la densité des nœuds est suffisante ; certains nœuds doivent être actifs afin d'assurer la communication en multi sauts et d'autres sont mis en mode inactif pendant une durée déterminée. SPAN choisit des « coordinateurs » dans le réseau ; les coordinateurs restent en mode veille d'une façon permanente; les nœuds restants sont en mode inactif (économiser l'énergie) et se réveillent périodiquement pour vérifier s'ils doivent devenir des coordinateurs. La sélection des coordinateurs est faite d'une manière locale, en basant sur l'énergie restante dans le nœud et le nombre de nœuds voisins qui bénéficie de la présence de ce nœud. Un algorithme aléatoire est mis en place pour faire tourner le rôle du coordinateur afin d'éviter une consommation excessive de certains nœuds sur d'autres. Le protocole SPAN assure que chaque nœud doit

avoir au minimum au seul coordinateur et minimise le nombre de coordinateurs afin d'augmenter la durée de vie du réseau sans affecter sa performance. Cependant, ce protocole n'est pas adapté au réseau à faible ou moyenne densité.

III.3.4. Partage de la charge

Contrairement aux catégories qu'on a vues précédemment qui se basent sur l'énergie restante ou la puissance de transmission, les protocoles dans cette catégorie se concentrent sur l'aspect d'équilibrage de charge sur les chemins disponibles. Ils partagent le flux de données sur les chemins disponibles afin d'assurer une consommation d'énergie équilibrée dans le réseau. L'équilibrage de la charge permet de réduire l'utilisation des nœuds qui ont un niveau d'énergie faible ce qui évite l'épuisement d'énergie des nœuds et augmente la durée de vie du réseau. Les protocoles multi chemins peuvent être considérés comme des protocoles qui partagent la charge s'ils ont utilisé les chemins multiples simultanément. Nous décrivons quelques protocoles ([40], [68], [69]) de cette catégorie.

MP-OLSR [40] est un protocole multi chemins qui repose sur le concept de partage de la charge sur les chemins multiples. Malgré que ce protocole n'utilise aucune contrainte d'énergie pour la sélection des chemins, il offre une distribution de la charge en partageant le flux sur tous les chemins disponibles. La limite de ce protocole est qu'il est basé sur le nombre de sauts dont le plus court chemin est considéré comme le meilleur chemin.

LB-AOMDV (Load Balancing AOMDV) [69] est une extension du protocole de routage AOMDV avec prise en compte de l'équilibrage de la charge afin d'améliorer la fiabilité de transmission. Le protocole LB-AOMDV applique une distribution uniforme du flux de données sur les chemins disponibles. Ce protocole calcule durant le processus de découverte (le même concept de découverte du chemin que le protocole AOMDV) l'énergie requise pour transmettre un paquet depuis le nœud source S vers le nœud de destination D pour chaque chemin trouvé. Il estime la bande passante inutilisée de chaque chemin suivant la formule suivante :

$$MUB_{SD} = \min_{S=1 \text{ to } D}(UB) \quad (9)$$

Par conséquent, la valeur de la bande passante attribuée pour chaque chemin est la bande passante minimale disponible dans les liens composant ce chemin. LB-AOMDV crée une liste des chemins qualifiés satisfaisant la contrainte d'énergie (l'énergie restante est suffisante pour transmettre les paquets). Les chemins choisis sont classés suivant l'ordre de la bande passante disponible et le flux du trafic sera distribué sur ces chemins suivant l'ordre de classement. Le protocole LB-AOMDV réduit le nombre de nœuds défaillants et améliore la performance du réseau.

Finalement, les chercheurs ont mis des efforts en proposant plusieurs approches pour réduire la consommation d'énergie et augmenter la durée de vie du réseau; chaque approche a des avantages et des limites. Nous avons décrit dans cette partie la classification des différentes métriques de la contrainte d'énergie. On a cité aussi quelques protocoles de routage de la littérature pour chaque catégorie. La contrainte d'énergie reste un problème critique pour les réseaux ad hoc. Une solution intéressante est d'utiliser une combinaison de

plusieurs facteurs d'énergie afin de maximiser la performance. Nous passons dans la partie suivante à une autre contrainte importante qui est la stabilité.

III.4. Routage avec contrainte de stabilité

L'une des caractéristiques principales du réseau ad hoc est la mobilité des nœuds ce qui représente un avantage majeur où les nœuds se déplacent librement. Le nœud doit rester dans la zone de couverture pour garder la connectivité avec leurs voisins. Cependant vu la limite de la portée de la transmission des nœuds, le déplacement d'un nœud hors de la zone de couverture permet de couper la liaison avec le nœud voisin (communication directe) et la transmission n'est plus possible entre ces deux nœuds. Un changement fréquent de la topologie à cause de ces coupures a un impact sur la performance du réseau et la fiabilité de transmission et même sur certains critères de qualité de service tel que le délai de bout en bout, taux de perte...

Du fait l'impact de la mobilité des nœuds sur la performance des réseaux, la stabilité des liens qui est principalement affectée par la mobilité des nœuds font l'objet de plusieurs recherches durant la dernière décennie. L'objectif est de sélectionner le chemin le plus stable afin de réduire le nombre de coupures et assurer une meilleure fiabilité. Plusieurs techniques ont été utilisées dans la littérature : méthode de prédiction ([32], [70], [71]), méthode de probabilité ([7], [72]), estimation de durée de vie [73].

III.4.1. La Notion de stabilité

La stabilité est généralement mesurée à la base de la mobilité des nœuds. La stabilité d'un lien est définie comme la durée de vie restante d'un lien. Les valeurs de stabilité du lien peuvent être une distance, une probabilité ou d'autres valeurs liées à la stabilité[9].

La stabilité du chemin est généralement calculée par trois méthodes [9]:

- Par sélection : la stabilité du chemin est la valeur de stabilité du lien minimal composant le chemin.
- Par multiplication : la stabilité du chemin est représentée par la multiplication des valeurs de stabilité des liens composant le chemin (probabilité).
- Par somme : la stabilité du chemin est représentée par la somme des valeurs de stabilité des liens composant le chemin.

III.4.2. Classification de la stabilité des liens.

La stabilité est classifiée suivant le facteur utilisé pour mesurer la stabilité en deux classes : basée sur la distance, basée sur la mobilité [9].

Dans cette partie, nous allons décrire chaque classe en citant certains protocoles basés sur la stabilité de la littérature.

III.4.2.1. Stabilité basée sur la distance

Les protocoles de cette classe utilisent la distance entre deux nœuds voisins pour évaluer la stabilité du lien. La distance peut être mesurée par : la position des nœuds (coordonnées), la puissance du signal ou le délai (ce dernier est rarement utilisé). Plus que la distance entre deux

nœuds voisins est faible, plus la probabilité que le lien de ces deux nœuds soit valide pendant une longue période. Donc, cette méthode favorise les liens ayant une petite distance.

Le protocole TBP-SE (Ticket-based Probing with Stability Estimation) [74] est une extension du protocole TBP qui est un protocole multi chemins basé sur la qualité du service (QoS). TBP est basé sur deux contraintes : le délai et le coût. Le coût n'est pas spécifié et il peut être n'importe quel facteur qui doit être satisfait et minimisé tel que le nombre de sauts, bande passante ou un autre facteur de qualité. Il introduit un concept d'étiquette en diffusant un message appelé « prob » dans le réseau en deux types : vert et jaune. Les messages jaunes sont transmis et passent par des nœuds intermédiaires basant sur la contrainte du délai minimal du chemin ; les messages verts basant sur le coût minimal du chemin. La limite de ce protocole est qu'il repose sur une classification des liens en deux catégories basant sur la nouveauté du lien dont seulement les liens qui durent pendant un certain temps peuvent transmettre les probs (appelé des liens stationnaires) ; les nouveaux liens sont considérés comme des liens de transition. Cette proposition n'est pas toujours vraie. Le protocole TBP-SE est proposé pour intégrer la contrainte de stabilité dans le processus de découverte et la sélection du chemin. Il mesure la stabilité en utilisant les coordonnées de nœuds s'ils sont équipés par GPS, sinon la stabilité est mesurée par la puissance du signal (RSSI). Initialement, chaque nœud calcule la valeur de durée de vie estimée de ses liens basant sur la distance suivant la formule :

$$\rho_{ij}(t) = \frac{R - Dis_{ij}(t)}{Dis_{ij}(t) - Dis_{ij}(t-T)} ; R: \text{transmission range} \quad (10)$$

Avec $Dis_{ij}(t)$ représente la distance actuelle et $Dis_{ij}(t - T)$ représente l'ancienne distance

TBP-SE introduit deux seuils : seul maximal ρ_{max} et minimal ρ_{min} . Le protocole TBP-SE favorise les liens ayant une petite distance. La stabilité d'un lien est calculée comme suit ($0 < \mu < 1$):

$$\begin{cases} S_{ij} = \frac{\rho_{ij}(t) - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} * \mu & \text{si } \rho_{ij}(t) < \rho_{min} \\ S_{ij} = 0 & \text{si } \rho_{ij}(t) > \rho_{max} \\ S_{ij} = \mu & \text{sinon} \end{cases} \quad (11)$$

TBP-SE utilise la stabilité du chemin par multiplication. Le chemin qui a la valeur la plus élevée de la stabilité est choisi comme un chemin optimal. En regardant la formule, on peut dire que les liens ayant une grande distance seront exclus (multiplication par 0). Cependant, cette formule est imprécise (voir Figure 16): les liens qui sont considérés comme instables à cause de la longue distance entre les deux nœuds peuvent avoir une durée de vie plus grande si on regarde leur mobilité (les nœuds se rapprochent avec une vitesse faible) ; de même façon dans le cas contraire, si deux nœuds sont très proches, mais s'éloigneront.



Figure 16. Cas de mouvement des nœuds

Le modèle de stabilité améliorée ESM (Enhanced Stability Model) [75] permet d'estimer la valeur de la stabilité basant sur la puissance du signal RSSI. Il utilise deux seuils qui divisent la stabilité en trois cas :

- Si la puissance du signal est élevée (supérieure au seuil Thr_{max}) donc le lien est considéré comme stable.
- Si la puissance du signal est faible (inférieure au seuil Thr_{min}) donc le lien est considéré comme instable.
- Sinon, il calcule la différence entre la valeur de la puissance récente et la précédente, notée par DSS (Differentiated Signal Strength) et le compare avec un paramètre u . Si la valeur de DSS est plus grande que u alors le lien est stable.

Le modèle ESM a été comparé à d'autres modèles et il présente des améliorations en matière du taux de livraison des paquets.

III.4.2.2. Stabilité basée sur la mobilité

Contrairement à la première classe qui se base sur la distance pour évaluer la stabilité du lien, cette classe repose sur les paramètres de mobilité telle que la vitesse et la direction du mouvement pour calculer la stabilité.

Le facteur le plus connu dans cette classe est la durée de vie d'un lien, nommée LET (Link Expiration Time). Les auteurs [76] ont défini LET du lien entre le nœud i et le nœud j qui ont les coordonnées $i(x_i, y_i)$ et $j(x_j, y_j)$ et une vitesse v_i et v_j respectivement, par la fonction suivante :

$$LET_{ij} = \frac{-(ab+cd) + \sqrt{(a^2+c^2)r^2 - (ad-bc)^2}}{a^2 + c^2} \quad (12)$$

avec $\begin{cases} a = v_i \cdot \cos\theta_i - v_j \cdot \cos\theta_j \\ b = x_i - x_j \end{cases}$, et $\begin{cases} c = v_i \cdot \sin\theta_i - v_j \cdot \sin\theta_j \\ d = y_i - y_j \end{cases}$

Plusieurs recherches ([77], [78], [79], [80]) ont intégrés la notion LET dans leurs solutions.

Le protocole MDA-AODV (Mobility and Direction Aware AODV) [81] est une extension du protocole AODV avec prise en compte de la contrainte de mobilité basée sur la mobilité des nœuds. MDA-AODV suppose que tous les nœuds sont équipés par le GPS afin de déterminer les coordonnées de chaque nœud. Une adaptation est faite sur le message *Hello* standard du protocole AODV en ajoutant deux champs qui représentent la position et la vitesse actuelle du nœud. Le protocole exploite les informations des deux successifs messages *Hello* pour déterminer le drapeau du nœud qui est calculé en comparant les deux valeurs. Le drapeau prend trois valeurs : 0 si la distance est fixe, 1 si la distance augmente ou -1 si la distance décroît. Chaque nœud enregistre la vitesse et le drapeau dans la table de routage. Durant le processus de découverte, si la vitesse d'un nœud dépasse un seuil Thr (70m/s), alors le message *RREQ* sera ignoré. Si le message *RREQ* atteint le nœud de destination ou un nœud intermédiaire qui a un chemin valide vers le nœud de destination, la vitesse du nœud transmettant la requête doit être inférieure à la vitesse moyenne de tous les voisins de ce nœud. Dans ce cas, un *RREP* sera transmis vers le nœud source, sinon le message *RREQ* sera ignoré. Le protocole MDA-AODV construit un chemin stable basant sur les paramètres de mobilité permettant de réduire les coupures des chemins ce qui augmente la durée de vie du

chemin. Néanmoins, il requiert le GPS pour tous les nœuds qui ont certaines limitations : ce service peut être indisponible à cause de l'environnement, surtout dans les scénarios indoor ; de plus, il consomme plus d'énergie.

Finalement, la stabilité basée seulement sur la distance peut surestimer la valeur de stabilité vu que la distance elle-même ne reflète pas le comportement de la mobilité. Pour obtenir de meilleures performances, nous pouvons utiliser la variation de la distance. La deuxième classe permet d'estimer la stabilité suivant les paramètres de la mobilité qui sont utilisés pour calculer la durée de vie du chemin. En outre, le comportement de mobilité des nœuds change suivant le modèle de mobilité qui peut être dans une zone urbaine avec restriction ou dans un espace libre. Nous discutons ensuite les différents modèles de mobilités et leurs impacts.

III.4.3. Les modèles de mobilité

Le modèle de mobilité est conçu pour décrire le comportement de mouvement des nœuds (i.e. comment les nœuds se déplacent, leurs vitesses, etc.). Plusieurs modèles de mobilité ont été proposés dans la littérature ; ils peuvent être classés en deux catégories : aléatoire et non aléatoire ; les modèles non aléatoires sont classés en 03 catégories (voir Figure 17) [82].

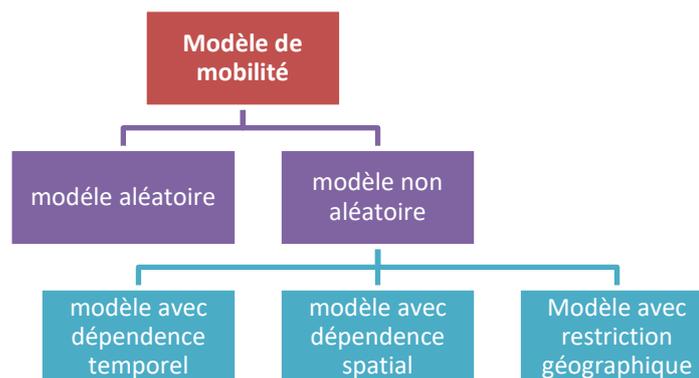


Figure 17. Classification des modèles de mobilité

III.4.3.1. **Modèle de mobilité aléatoire**

Les nœuds dans ce modèle se déplacent de manière aléatoire. Plus précisément, la position de destination, la vitesse et la direction sont toutes choisies au hasard et indépendamment des autres nœuds. Ce type de modèle a été utilisé dans de nombreuses études dans la simulation. Parmi les modèles de mobilité [83], nous citons :

- **RWP (Random Waypoint)** : C'est le modèle de mobilité le plus simple et le plus utilisé. Il utilise deux paramètres : la vitesse maximale V_{max} et minimale V_{min} , avec un temps de pause T_{pause} . Initialement, les nœuds prennent des positions aléatoires. Ensuite, chaque nœud choisit une position de destination aléatoire avec une vitesse aléatoire dans l'intervalle $[V_{min}, V_{max}]$ (indépendamment des autres nœuds) et se dirige vers cette position. Une fois le nœud atteint la destination, il attend une durée aléatoire entre 0 et T_{pause} avant de choisir une autre destination de la même façon. Ce processus se répète jusqu'à la fin de la simulation.
- **RW (Random Walk)** : Ce modèle a été initialement proposé pour émuler le mouvement imprévisible des particules en physique. Contrairement au modèle RWP

dont le nœud change son mouvement après qu'il atteint la position de destination, les nœuds se déplacent vers une nouvelle position en choisissant une vitesse aléatoire (comme RWP entre V_{min} et V_{max}) et une direction aléatoire et pas une destination. La vitesse et la direction du mouvement sont changées chaque intervalle de temps T dans lequel le nœud choisit aléatoirement une autre vitesse et direction.

- **RD (Random Direction) :** Ce modèle est développé principalement pour éviter le problème de densité du modèle RWP (la plupart des nœuds sont regroupés dans la zone centrale de l'espace de simulation). Pour éviter ce comportement, le nœud dans le modèle RD choisit aléatoirement une direction et se déplace d'une façon continue jusqu'à la bordure de l'espace de simulation. Dans ce cas, il attend un temps déterminé avant de choisir une autre direction.

III.4.3.2. Modèle de mobilité avec dépendance temporelle

Le modèle aléatoire ne reflète pas le mouvement dans la réalité. La mobilité des nœuds peut être limitée par certaines contraintes physiques. Dans ce modèle, le mouvement d'un nœud dépend du mouvement précédent. Le modèle de dépendance temporelle le plus connu est Gauss-Markov.

- **Gauss-Markov :** Ce modèle est conçu pour réduire l'effet du choix aléatoire des paramètres de mobilité en ajoutant une dépendance temporelle dont la mobilité actuelle d'un nœud dépend implicitement à son ancien mouvement. Le modèle Gauss-Markov est similaire que Random Walk ou le nœud choisit une vitesse et une direction qui sera changée à chaque intervalle de temps T [83]. Dans Gauss-Markov, ce changement de paramètre de mobilité (vitesse et direction) est calculé suivant la vitesse et la direction précédente en utilisant un coefficient α (varie entre 0 et 1) qui représente le degré de dépendance comme suit :

$$\begin{cases} S_n = \alpha \cdot S_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot \mu + \sqrt{(1 - \alpha^2)} \cdot S_{x_{n-1}} \\ \theta_n = \alpha \cdot \theta_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot \mu + \sqrt{(1 - \alpha^2)} \cdot \theta_{x_{n-1}} \end{cases} \quad (13)$$

Avec S_n et θ_n qui représentent la vitesse et la direction d'un nœud à l'instance n . Le coefficient α varie entre 0 et 1 pour ajuster le degré de dépendance. $S_{x_{n-1}}$ et $\theta_{x_{n-1}}$ sont deux variables aléatoires de distribution gaussienne.

III.4.3.3. Modèle de mobilité avec dépendance spatiale

Dans les modèles de mobilité qu'on a vus précédemment, chaque nœud à un mouvement soit aléatoire ou dépend de son précédent mouvement; mais il n'est pas affecté par le déplacement des nœuds voisins. Le mouvement dans ce modèle ressemble de plus en plus à un déplacement en groupe ; par exemple le déplacement d'une famille ou d'une équipe qui suit le chef d'équipe. Alors le nœud dans ce type de mobilité est affecté par le mouvement des nœuds voisins. Parmi les modèles de mobilité avec dépendance spatiale, on cite [82] :

- **Reference Point Group :** les nœuds se déplacent en groupes. Chaque groupe a un centre (un chef du groupe). Le mouvement du chef de groupe détermine le mouvement de tous les nœuds de ce groupe. À un moment donné T , le chef du groupe choisit une vitesse aléatoire vers une position de destination prévue (point de référence). Les

autres nœuds du groupe sont affectés par ce mouvement en choisissant aléatoirement la vitesse et la direction de mobilité d'une façon qu'ils seront placés au voisinage du point de référence au moment $T+1$.

- **Column Mobility** : il simule l'aspect de recherche. Dans ce modèle, un ensemble de nœuds se déplace autour d'une ligne (ou colonne) donnée (par exemple : une équipe de soldats balaye une zone).

III.4.3.4. Modèle de mobilité avec restriction géographique

Les nœuds dans les autres modèles de mobilité se déplacent d'une manière libre (n'importe où) dans la zone de simulation (espace libre). Cependant, dans la réalité le mouvement n'est pas totalement libre, mais il est restreint tel que : le déplacement des humains dans une ville, le déplacement des véhicules dans les routes, etc. À cet effet, des modèles de mobilité ont été proposés pour couvrir ce problème en tenant compte d'un mouvement réel et restreint :

- **Freeway Mobility Model** [82] : c'est le modèle le plus simple qui intègre les contraintes géographiques dans la mobilité pour limiter le mouvement des nœuds aux chemins de la carte (des routes). Les chemins de la carte peuvent être générés aléatoirement dont la carte représente un modèle d'autoroute qui a un certain nombre d'autoroutes et chaque autoroute a un certain nombre de voies de circulation dans les deux sens. Initialement, les nœuds sont placés aléatoirement sur les bords. Chaque nœud se dirige vers une destination (choisis au hasard) par le chemin le plus court passant seulement par les chemins disponibles (déplacement restreint que sur les chemins). À l'arrivée, le nœud prend une pause pendant un intervalle T et choisit à nouveau une nouvelle destination pour le prochain mouvement.
- **Manhattan Mobility Model** [83] : C'est un modèle similaire que le modèle Freeway, mais avec une carte différente qui se compose d'un nombre de chemins vertical u et horizontale v (représente les rues dans une ville). Chaque nœud se déplace sur le chemin, et dans chaque intersection, il a une probabilité de tourner à gauche 0.25 et à droite 0.25.

III.4.3.5. Modèle de mobilité humaine

La majorité des modèles de mobilité ne sont pas réalistes. Des études ([84], [85], [86]) ont été faites sur l'impact des modèles de mobilité sur la performance des protocoles de routage. Ces études prouvent que les protocoles de routage peuvent avoir des différentes performances dont le même protocole peut fournir de meilleures performances dans un modèle et des performances dégradées dans un autre modèle. À cet effet, certains chercheurs tentent de contribuer dans ce contexte et proposent des modèles qui reposent une mobilité humaine. Parmi ces modèles, nous citons le modèle de mobilité SMOOTH [87]. SMOOTH est un modèle de mobilité récent, réaliste et basé sur plusieurs caractéristiques du mouvement humain. Les nœuds ne se déplacent pas au hasard, mais simulent de vraies marches humaines. Le concept est de créer un nombre spécifique de sites nommés « clusters » (qui représentent des communautés) et d'attribuer une popularité aléatoire pour chacune. Le nœud mobile a été initialement attribué au hasard aux clusters. Un nœud mobile visite quelques emplacements

plus fréquemment que d'autres emplacements et peut explorer un nouvel emplacement avec une probabilité spécifique P ou visiter un emplacement précédemment visité. Lors de son déplacement, lorsqu'un nœud atteint une destination, il reste pendant un temps d'attente précis T avant de choisir un autre emplacement.

III.5. Routage avec contrainte d'énergie et la stabilité.

Nous avons discuté dans les parties précédentes les deux contraintes : énergie et stabilité. L'utilisation d'une seule contrainte n'est pas suffisante pour assurer des meilleures performances du réseau ad hoc. Nous pouvons dire que la coupure des liens a un impact considérable sur la performance du réseau : surcoût du flux de contrôle pour maintenir la communication, augmentation du taux de perte des paquets, perte d'énergie (les paquets perdus et le flux de contrôle supplémentaire, etc. Par conséquent, deux causes fondamentales produisent ces coupures : la défaillance d'un nœud suite à l'épuisement d'énergie et la mobilité lorsque le nœud quitte sa portée de la transmission d'un autre nœud.

En effet, les chercheurs s'intéressent à combiner les deux contraintes pour bénéficier des avantages des deux contraintes, la stabilité et l'énergie afin de sélectionner le chemin optimal. Cette combinaison permet d'assurer un routage fiable qui réduit efficacement les coupures des liens et assure une durée de vie maximale du chemin choisi. Plusieurs protocoles ([88], [89], [90], [91]) de routage combinant les deux contraintes l'énergie et la stabilité ont été proposées dans la littérature.

Dans [79], une approche de routage multi chemins efficace et stable avec prise en compte de la congestion est proposée. Cette approche permet d'estimer l'énergie résiduelle (en tenant compte de la consommation d'énergie durant la transmission et la réception) et la stabilité (en utilisant LET). Ces deux contraintes sont utilisées durant le processus de sélection des chemins. Pour estimer la stabilité du lien, cette approche utilise la fonction LET qui calcule la durée de vie d'un lien suivant la position, la vitesse et la direction du mouvement des deux nœuds formant ce lien. Pour l'énergie, le protocole s'intéresse à collecter deux valeurs énergétiques : $minE$ qui représente l'énergie minimale des nœuds composant un chemin et $avgE$ qui représente l'énergie moyenne de ces nœuds. Les messages $RREQ$ et $RREP$ sont modifiés en ajoutant trois champs : $minE$, $avgE$ et LET . Durant la découverte des chemins, le premier voisin du nœud source ajoute la valeur d'énergie résiduelle dans les deux champs $minE$ et $avgE$, et la valeur LET du lien dans le champ LET . Chaque nœud intermédiaire ensuite reçoit le message $RREQ$, compare son énergie avec la valeur du $minE$, s'il a une valeur d'énergie moins que $minE$, alors il mettra à jour ce champ par sa valeur d'énergie. Il calcule aussi la valeur d'énergie moyenne et change la valeur du champ $avgE$ par la nouvelle valeur. De plus, il mettra à jour la valeur LET du message par la somme du LET du message et le LET du lien courant. A la fin, le nœud source recevra un ou plusieurs messages $RREP$ représentant des chemins trouvés vers le nœud de destination ; il choisit le chemin qui a une stabilité et une énergie maximale. Cependant, le critère d'évaluation basé sur la somme des $LETs$ n'est pas optimal dont nous pouvons avoir un chemin qui a la valeur maximale de somme de LET comparant par les autres chemins, mais il possède un lien qui a un LET très faible ; dans ce cas, une coupure est fort probable.

Le protocole Fuzzy-AODV [91] basé sur le protocole AODV en utilisant les contraintes de stabilité et d'énergie. Il utilise trois paramètres pour le critère de sélection des chemins: l'énergie résiduelle, la mobilité des nœuds et la distance. Ces paramètres ont un impact considérable sur la stabilité des liens. Les auteurs proposent un système qui à deux systèmes de logique floue. Le premier est nommé *FLS1* avec trois entrées : la moyenne de l'énergie des nœuds traversés par le message de requête, la distance entre les deux nœuds communicants et la variation de la distance entre les nœuds. *FLS1* est appliqué au niveau de chaque nœud intermédiaire qui n'a aucun chemin vers le nœud de destination. Il prend des décisions appropriées basant sur la valeur calculée représentant la stabilité qui mesure la qualité des liens entre le nœud source et le nœud intermédiaire. Le deuxième système *FLS2* a deux entrées (voir Figure 18) : la stabilité (*FLS1*) et le nombre de sauts ; ce système est appliqué seulement aux nœuds ayant un chemin vers le nœud de destination ou la destination elle-même. Le résultat de *FLS2* est le poids qui sera attribué pour chaque chemin afin de sélectionner le chemin le plus stable.

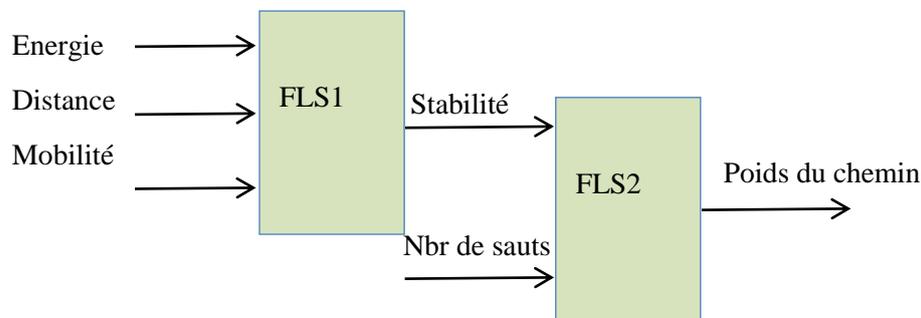


Figure 18. Système logique de flou du protocole Fuzzy-AODV

D'autres recherches ([92], [93]) ont intégré les méthodes bio-inspirées multi contraintes afin de construire et choisir le chemin optimal entre une source et une destination. Dans [93], une nouvelle métrique de routage basée sur l'évolution appelée EVO a été proposée. Cette métrique est générée automatiquement en utilisant une programmation génétique. Le protocole EVO-AODV est une extension du protocole AODV qui utilise deux contraintes : la mobilité (il est mesuré en fonction de changement du nombre des nœuds voisins) et le volume du trafic (la bande passante). La méthode EVO est utilisée pour évaluer les individus (nœuds) en appliquant des opérations de permutation et de mutation. Durant le processus de découverte, les chemins sont classés suivant la valeur du nouveau champ qui est utilisé dans *RREP* pour calculer la valeur EVO agrégée (représente la stabilité et la densité du trafic du chemin) des nœuds intermédiaires de chaque chemin. Chaque nœud calcule sa propre valeur EVO à chaque intervalle de temps T . Après la réception des *RREPs*, le nœud source choisit le meilleur chemin qui a la valeur minimale de la métrique EVO. Cependant, ces méthodes requièrent une phase d'apprentissage sur les différents scénarios de mobilité (un entraînement) afin d'améliorer la fonction de fitness, évaluer la métrique utilisée et ajuster les différents paramètres.

III.6. Conclusion

Les recherches ont prouvé que les protocoles de routages basés sur le nombre de sauts n'offrent pas de meilleures performances parce qu'ils ignorent les contraintes importantes qui

caractérisent le réseau ad hoc et affectent la transmission telle que l'énergie, la mobilité, la qualité du signal, etc. Dans ce chapitre, nous avons étudié deux importantes contraintes qui ont un impact important sur la performance du protocole et la durée de vie du réseau : l'énergie et la stabilité. Un état de l'art est présenté pour chaque contrainte.

Les nœuds dans le réseau ad hoc consomment leurs énergies résiduelles par n'importe quelles opérations qu'ils ont faites, notamment durant l'échange des données et la participation dans le routage. Nous avons décrit la consommation d'énergie qui change suivant le mode d'opération et discuté les différentes sources de pertes d'énergie. Une classification des approches de conservation d'énergie est présentée comme suite: un routage avec conservation d'énergie, contrôle la puissance de signal, gestion du mode inactif et partage de la charge. L'objectif principal d'utiliser la contrainte d'énergie dans le protocole de routage est de maximiser la durée de vie des nœuds et du réseau afin de fournir une bonne gestion énergétique, réduire le nombre de nœuds qui épuisent leur énergie et minimiser la consommation d'énergie.

La topologie dynamique du réseau produite par la mobilité des nœuds provoque des coupures fréquentes des liens. La contrainte stabilité permet de mesurer la durée de vie restante d'un lien en fonction de sa mobilité. La stabilité est classifiée en deux catégories : basée sur la distance ou sur la mobilité. L'intégration de la contrainte stabilité dans le routage nous permet d'éviter les liens qui ont une grande probabilité d'être rompus en étudiant la mobilité des nœuds.

Nous avons illustré ensuite les différents modèles de mobilité de la littérature. Les modèles de mobilité définissent le comportement du mouvement des nœuds (la façon par laquelle les nœuds se déplacent dans un espace). Ils sont classés principalement en deux classes : modèles aléatoire et non aléatoire. La majorité de ces modèles ne reflète pas le mouvement réaliste. Des études ont prouvées que le choix du modèle de mobilité affecte les performances des réseaux. Récemment, de nouveaux modèles modélisant le mouvement humain ont été développés afin de bien évaluer les protocoles touchant les aspects réels de notre vie.

Finalement, nous avons présenté quelques protocoles de routage qui ont combinés les deux contraintes l'énergie et la stabilité afin d'améliorer les performances des réseaux et assurer une fiable communication. Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre première contribution qui est un nouveau protocole de routage multi chemins basé sur la stabilité et l'énergie.

CHAPITRE IV

Protocoles de Routage multi chemins : ESMRsc et ESMRua

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage réactif multi chemins à lien disjoint basé sur la stabilité et l'énergie pour un réseau ad hoc. L'idée principale de notre protocole est de découvrir plusieurs chemins entre un nœud source et un nœud de destination, en exploitant l'énergie (qui évalue la durée de vie des nœuds) et le degré de mobilité des nœuds pour évaluer efficacement les chemins et sélectionner le chemin le plus stable. Nous avons choisi l'énergie pour empêcher qu'un nœud critique épuise son énergie restante et quitte le réseau et la stabilité pour éviter les chemins qui se composent des liens instables. La combinaison de ces deux contraintes nous permettra de choisir le chemin le plus stable avec une énergie maximale pour assurer une transmission fiable de données et fournir de meilleures performances. Notre protocole est conçu sur un modèle de mobilité réaliste non aléatoire.

En deuxième partie de ce chapitre, nous présentons notre deuxième contribution qui est une extension de la première solution en étudiant avec analyse trois variantes de la fonction d'évaluation de la stabilité.

IV.1. Le protocole de routage ESMRsc

Nous avons proposé un nouveau protocole de routage ESMRsc (Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol in Smart City) [17]. ESMRsc est un protocole de routage réactif multi chemins basé sur le protocole AOMDV [18] à lien disjoint (utilisant le nombre de sauts comme une métrique d'évaluation : voir détails dans le deuxième chapitre) en tenant compte des contraintes de stabilité et d'énergie.

Le choix du nombre de sauts comme une contrainte pour évaluer les chemins n'est pas optimal parce qu'il existe plusieurs contraintes qui affectent la fiabilité de transmission. Parmi ces contraintes l'énergie ; certains nœuds épuisent leurs énergies rapidement que d'autres nœuds (différents volumes de trafic). Le choix d'un chemin qui contient un nœud avec un niveau d'énergie restante faible permet d'épuiser son énergie et il sera un nœud défaillant. Cela conduira à une rupture du chemin actif et peut-être d'autres transmissions si le nœud est décisif (plusieurs transmissions passent par ce nœud). De plus, la négligence de l'énergie augmente considérablement le nombre de nœuds épuisés ce qui affecte négativement le fonctionnement du réseau par l'apparition de zones isolées.

Une autre contrainte importante est la stabilité (en matière de mobilité) vu que le mouvement des nœuds peut provoquer des coupures fréquentes des liens. De plus, le modèle de mobilité choisi aussi a un impact sur la performance du protocole. Donc, il est préférable d'évaluer le protocole dans un modèle réaliste. Chaque coupure réduit la performance du réseau, car elle augmente le taux de paquets perdus, génère un flux de message de contrôle

pour maintenir le chemin ou dans les pires des cas, déclenche une nouvelle découverte qui sera très coûteuse (consommation d'énergie, délais d'établissement de la transmission, flux de contrôle important ...).

Dans ce contexte, nous avons proposé un nouveau protocole ESMRsc conçu pour fonctionner dans une ville. Il consiste à évaluer les chemins durant le processus de découverte en matière d'énergie et de stabilité afin de donner au nœud source la capacité de choisir le chemin le plus stable avec une valeur énergétique maximale. Notre proposition a été comparée au protocole ZD-AOMDV [94], ESMRsc améliore les performances du réseau et réduit la consommation d'énergie.

Notre protocole conserve les mêmes processus de découverte et de maintenance du protocole AOMDV avec certaines adaptations pour intégrer la stabilité et l'énergie. Essentiellement, nous avons modifié le processus d'évaluation et de sélection du chemin. Nous avons décrit les deux fonctions de coût d'énergie et de stabilité en précisant les modifications effectuées, ainsi que la fonction objective qui combine les deux contraintes.

IV.1.1. Le processus de découverte du chemin

Le protocole ESMRsc comporte le même processus de découverte des chemins multiples qu'AOMDV avec des adaptations. Quand un nœud source veut transmettre des données à un nœud de destination et qui n'a aucun chemin actif vers lui, il déclenche une découverte par la diffusion d'un message *RREQ* (Route Request) vers tous les nœuds voisins, le message *RREQ* est retransmis par les nœuds intermédiaires jusqu'à atteindre le nœud de destination. Le nœud de destination répond par un message *RREP* (Route Reply) à chaque *RREQ* reçue ; le message *RREP* passe par le chemin inverse afin d'atteindre le nœud source. Une modification est effectuée dans la structure du message *RREQ* et *RREP* en insérant deux nouveaux champs *St* et *En* représentant le coût de la stabilité et de l'énergie respectivement (voir Figure 19 et Figure 20). Ces champs sont mis à jour au niveau de chaque nœud intermédiaire suivant la fonction de la stabilité et d'énergie.

Source ID	Numéro de Séquence Source	Destination ID	Numéro de Séquence Destination	Broadcast_ID	Hopcount	$St_{i,j}(t)$	$En_{i,j}(t)$
-----------	---------------------------	----------------	--------------------------------	--------------	----------	---------------	---------------

Figure 19. La structure du message RREQ

Source ID	Destination ID	Numéro de Séquence Destination	Hopcount	Lifetime	$St_{i,j}(t)$	$En_{i,j}(t)$
-----------	----------------	--------------------------------	----------	----------	---------------	---------------

Figure 20. La structure du message RREP

Afin qu'on puisse évaluer chaque chemin, nous avons ajouté la valeur énergétique *E* du chemin et l'ensemble des distances observées récemment avec les nœuds voisins. Les changements de la structure de la table de routage sont faits comme il est illustré dans la Figure 21.

Destination
Sequence_number
Advertised_hopcount
Route_list : {(nexthop1, hopcount1, E_1 , distance_list $\{(d_{i1}, t_1), (d_{i1}, t_2), (d_{i1}, t_3) \dots\}$), (nexthop2, hopcount2, E_2 , distance_list $\{(d_{i2}, t_1), (d_{i2}, t_2), (d_{i2}, t_3) \dots\}$),}
Expiration timeout

Figure 21. La structure des entrées de la table de routage du protocole ESMRsc

Durant le processus de découverte et après la diffusion du message de *RREQ*, chaque nœud intermédiaire mettre à jour les coûts de stabilité et d'énergie d'une façon où le coût d'énergie du chemin est le coût d'énergie minimale des liens composant le chemin et que le coût de stabilité du chemin est le coût de stabilité maximale des liens composant le chemin. Le nœud de destination répond à chaque message de *RREQ* par un message de *RREP*. De la même façon, chaque *RREP* passe en unicast par le chemin inverse pour atteindre le nœud source en collectant les coûts : énergie et stabilité.

Algorithme 3. Processus de découverte du protocole ESMR-sc pour RREQ
<p>Let S: sender of the message, i: the forwarding node, j: the current node</p> <p>if ($RREQ[SeqN] > SeqN^S$) then // s'il est un nouveau message (fraîche)</p> <p style="padding-left: 20px;">Remove all reverse paths to S from routing table</p> <p style="padding-left: 20px;">$SeqN^S := RREQ [SeqN]$</p> <p style="padding-left: 20px;">advertised_hopS= infinite</p> <p style="padding-left: 20px;">Create a new reverse path to S through i with ($RREQ [hop-count] + 1$)</p> <p>else if ($RREQ [SeqN] = SeqN^S$) then</p> <p style="padding-left: 20px;">Insert a new reverse path to S through i with ($RREQ [hop-count] + 1$)</p> <p>else Drop RREQ endif</p> <p>if ((j is destination) or (j have a valid route to destination)) then</p> <p style="padding-left: 20px;">generate RREP having</p> <p style="padding-left: 40px;">$RREP[fs] = \max(MSG[fs], fs_{i,j}(t))$ and $RREP[fq] = \min(MSG[fq], fq_{i,j}(t))$</p> <p style="padding-left: 20px;">Send RREP to S through i</p> <p>else if (is not duplicated RREQ) then // au niveau du nœud intermédiaire</p> <p style="padding-left: 20px;">$RREQ [hop-count] ++$</p> <p style="padding-left: 20px;">$RREQ [fs] = \max(RREQ [fs], fs_{i,j}(t))$</p> <p style="padding-left: 20px;">$RREQ [fq] = \min(RREQ [fq], fq_{i,j}(t))$</p> <p style="padding-left: 20px;">if (RREQ is not duplicated) then Re-broadcast RREQ to all neighbors</p> <p style="padding-left: 20px;">else drop RREQ endif</p> <p>endif</p>

IV.1.2. Le processus de sélection des chemins

Pour vérifier la connectivité des liens entre un nœud et ses voisins, un message *Hello* est diffusé périodiquement. Nous avons exploité ce message pour enregistrer la distance (dénotée

d_{ij}) entre le nœud et ses voisins. Les distances enregistrées seront utilisées pour calculer la stabilité des liens. Un nouveau champ est ajouté (voir Figure 22).

Destination	Numéro de Séquence Destination	Hop count	d_{ij}	Expiration timeout
-------------	--------------------------------------	-----------	----------	-----------------------

Figure 22. La structure de la table de routage du protocole EMSRsc

Lorsque le nœud source reçoit le premier message *RREP* (Route Reply), il attend un certain temps (noté *RREP_Wait_Time*) pour recevoir plus de *RREP* s'ils existent. La sélection du meilleur chemin entre un nœud source et un nœud destination, se fait en fonction du coût de chaque chemin qui est calculé en se basant sur l'énergie et la stabilité du chemin. Dans cette approche, deux fonctions sont définies : la fonction de coût d'énergie $fep_j(t)$ qui caractérise un chemin j à l'instant t d'un point de vue énergétique, et le coefficient de coût stabilité $fsp_j(t)$ qui représente la stabilité du chemin j à l'instant t .

Algorithme 4. Processus de découverte du protocole ESMR-sc pour RREP
<p>Let S: sender of the reply (destination), i: the forwarding node, j: the current node</p> <p>if ($RREP[SeqN] > SeqN^D$) then // s'il est un nouveau message (fraîche)</p> <p style="padding-left: 20px;">Remove all reverse paths to S from routing table</p> <p style="padding-left: 20px;">$SeqN^S := RREP [SeqN]$</p> <p style="padding-left: 20px;">advertised_hop^S= infinite</p> <p style="padding-left: 20px;">Create a new reverse path to S through i with ($RREP [hop-count] + 1$)</p> <p>else if ($RREP [SeqN] = SeqN^S$) then</p> <p style="padding-left: 20px;">Insert a new reverse path to S through i with ($RREP [hop-count] + 1$)</p> <p>else Drop RREP endif</p> <p>if (j is the destination of first reply) then // s'il est la source</p> <p style="padding-left: 20px;">set timer <i>RREP_Wait_Time</i></p> <p>endif</p> <p>if (<i>RREP_Wait_Time expire</i>) then start sending data endif</p>

IV.1.2.1. La fonction d'énergie

Afin de bien estimer la durée de vie du nœud, nous avons utilisé une fonction énergétique qui prend en compte l'énergie restante du nœud et le taux de consommation d'énergie pour calculer la durée de vie restante.

On formule la fonction $f_{en_{i,j}}(t)$ qui représente la fonction du coût énergétique du nœud i appartenant au chemin j à l'instant t comme suit:

$$f_{en_{i,j}}(t) = \frac{Elev_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t)} \quad (14)$$

Où $DR_{i,j}(t)$ est le taux de consommation d'énergie du nœud i appartenant au chemin j à l'instant t . $Elev_{i,j}(t)$ désigne le niveau d'énergie restant du nœud i appartenant au chemin j à l'instant t lors d'un processus de découverte entre un nœud source et un nœud de destination, donnée par :

$$Elev_{i,j}(t) = \frac{E_{i,j}(t)}{E_{average}} \quad (15)$$

Où $E_{i,j}(t)$ représente l'énergie résiduelle du nœud i appartenant au chemin j à l'instant t , et $E_{average}$ est l'énergie résiduelle moyenne des nœuds qui ont participé au processus de découverte des chemins multiples entre le nœud source et le nœud de destination.

$fep_j(t)$ représente le coût d'énergie d'un chemin j à l'instant t qui est égale à l'énergie résiduelle minimale des nœuds constituant le chemin j pour un nœud source s jusqu'au nœud de destination D à l'instant t , donner par :

$$fep_j(t) = \min_{i=1}^{n-1} (fen_{i,j}(t)) \quad (16)$$

IV.1.2.2. La fonction de stabilité

Pour calculer la stabilité des liens dans les réseaux ad hoc mobiles, nous considérons la mobilité des nœuds comme une métrique principale. Les protocoles basés sur la mobilité des nœuds utilisent certains critères inhérents à la mobilité des nœuds, tels que leurs coordonnées, leurs directions de mouvement ou leurs vitesses. Nous utilisons les coordonnées des nœuds pour notre protocole qui sont prises de manière instantanée. Notre protocole utilise principalement la distance pour mesurer la stabilité des liaisons. Nous exploitons les messages de découverte *RREQ*, *RREP* et les messages *Hello* pour collecter les informations de coordonnées des nœuds voisins, afin d'éviter le surcoût qui sera généré si nous allons utiliser de nouveaux messages.

Chaque nœud calcule la stabilité des liens avec tous ses voisins en exploitant le message *Hello* qui est diffusé périodiquement. le nœud i calcule la distance (noté $d_{i,j}$) qui sépare le nœud i d'un nœud voisin j . La fonction de coût de stabilité du lien entre les deux nœuds i et j à l'instant t notée $fsl_{i,j}(t)$, est donnée par :

$$fsl_{i,j}(t) = \frac{SDl_{i,j}(t)}{Ml_{i,j}(t)} \quad (17)$$

Où $Ml_{i,j}(t)$ représente la distance moyenne des derniers n distances enregistrées entre le nœud i et le nœud j , définies comme suit :

$$Ml_{i,j}(t) = \frac{\sum_{t=t_1}^{tn} d_{i,j}(t)}{n} \quad (18)$$

$SDl_{i,j}(t)$ est l'écart absolu moyen des distances enregistrées entre le nœud i et le nœud j , donné par:

$$SDl_{i,j}(t) = \frac{1}{n} \sum_{t=t_1}^{tn} |d_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)| \quad (19)$$

La fonction $fsl_{i,j}(t)$ représente le coefficient de variation, également appelé écart type relatif. Elle mesure la dispersion d'une distribution de probabilité. Dans notre cas, nous avons mesuré la dispersion des distances entre deux nœuds voisins afin d'avoir une vue sur le mouvement de ces nœuds. Si la valeur $fsl_{i,j}(t)$ tend vers 0, alors on a une bonne distribution des distances, ce qui signifie que le lien est stable. Si elle tend vers 1 ou vers l'infini, cela correspond à une mauvaise distribution, ce qui signifie que le lien est instable et a un grand risque d'être rompu. La Figure 23 montre un exemple de deux distributions (de 05 distances).

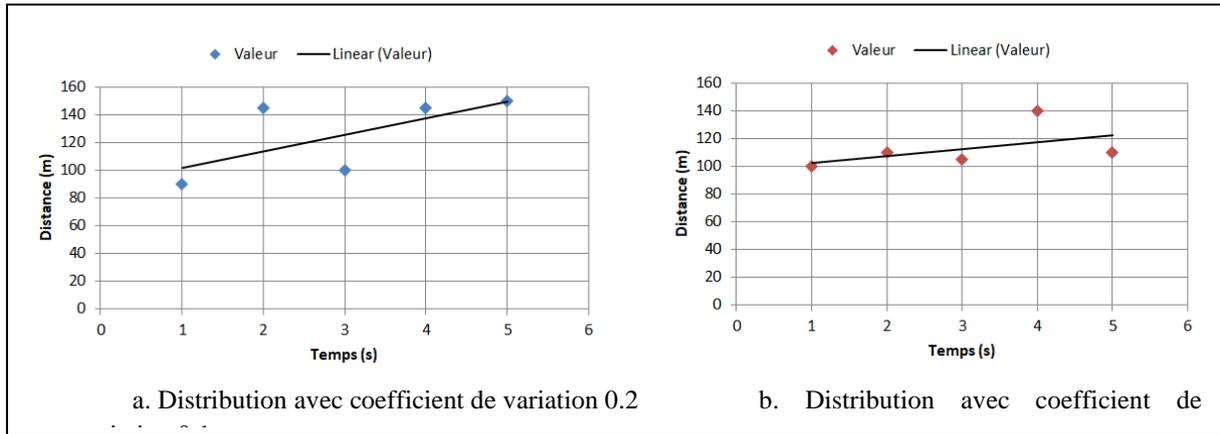


Figure 23. Exemple de deux distributions avec des différentes valeurs de coefficient de variation

En effet, la fonction du coût de la stabilité d'un chemin j à l'instant t , noté $fsp_j(t)$, représente la valeur de la stabilité maximale des liens constituant ce chemin. Elle est exprimé par :

$$fsp_j(t) = \max_{i=1}^{n-1} (fsl_{i,j}(t)) \quad (20)$$

IV.1.2.3. La fonction objective

Notre approche de sélection du chemin est basée sur les contraintes de stabilité et d'énergie. La fonction objective $fp_j(t)$ du chemin j à l'instant t est la combinaison des deux fonctions $fsp_j(t)$ et $fep_j(t)$ représente respectivement le coût de la stabilité et de l'énergie ; définit par :

$$fp_j(t) = fep_j(t) + \frac{1}{fsp_j(t)} \quad (21)$$

Le nœud source mesure pour chaque chemin le coût calculé en utilisant la fonction objective. Il trie les chemins suivant le coût de la fonction objective obtenu pour chaque chemin et choisit le chemin qui a la valeur maximale du coût (représente le chemin le plus stable portant une capacité énergétique maximale).

Notre protocole utilise le meilleur chemin jusqu'à devenir non valide (une coupure du chemin a été détectée); à ce moment, il choisit le meilleur chemin suivant au lieu de relancer une nouvelle découverte. Le processus de découverte sera déclenché seulement si tous les chemins trouvés lors de la découverte précédente sont devenus invalides.

IV.1.3. Evaluation des performances du protocole ESMRsc

Dans cette section, nous évaluerons les performances de notre protocole on le comparant au protocole ZD-AOMDV. Nous avons évalué les deux protocoles sur deux différents modèles de mobilité : RWP (Random Waypoint) [82] qui est le modèle le plus simple et le plus connu, Manhattan Grid [82] qui modélise le mouvement dans une ville.

L'évaluation des protocoles simulés est en fonction des critères de performance suivant :

- L'énergie consommée : c'est la moyenne d'énergie consommée par tous les nœuds du réseau pendant toute la simulation.
- Le nombre de paquets reçu : c'est le nombre de paquets de données reçus avec succès par le nœud de destination.

IV.1.3.1. Environnement et paramètres de simulation

Les performances d'un protocole de réseau ad hoc peuvent changer de manière significative lorsqu'il est évalué avec différents modèles de mobilité. Donc, la performance doit être évaluée avec le modèle de mobilité qui est proche du monde réel. Nous avons choisi deux modèles de mobilité : RPW qui est fréquemment utilisé dans les simulations des réseaux ad hoc, et Manhattan Grid qui est plus adapté au mouvement dans une ville.

Nous avons réalisé les simulations par le simulateur NS2 (Network Simulator 2) [95]. Le modèle radio utilisé est de type Wave LAN de Lucent (Lucent's Wave LAN)[47]qui a une portée radio de 250 mètres. Nous avons effectué 20 simulations pour chaque scénario. Les nœuds sources et destinations sont choisis aléatoirement. On suppose que l'énergie consommée d'un nœud lors de la réception ou lors de la transmission est égale à 281,8 mW[5] et que la consommation d'énergie en mode inactif est ignorée[16]. La vitesse de déplacement des nœuds varie entre 0-20 m/s (incrémenté par 4). Pour le modèle de mobilité Manhattan Grid, la probabilité de déplacement direct est de 0,5, la probabilité de tourner à gauche ou à droite est de 0,5 et la vitesse moyenne est 12 m/s. Les paramètres de simulations sont résumés dans la Table 2.

Modèle de mobilité	Paramètre	Valeur
Random Waypoint	Simulateur	NS2, NAM 1.13
	Type du canal	Channel /Wireless channel
	Protocole de routage	ZD-AOMDV/ ESMRc
	Temps de simulation	500 s
	Nombre des nœuds	50/100/150
	Modèle de propagation	Propagation/Two Ray Ground
	Type d'interface	Phy/WirelessPhy
	Type MAC	IEEE 802.11
	Type Interface de file d'attente	Queue/DropTail/PriQueue
	Max paquet dans ifq	70
	Surface de simulation	800 m×800 m
	Porté de transmission	250 m
	RREP_Wait_Time	1.0 s
	Manhattan Grid	Circular
Dimension du mouvement J		2D
Xblocks ,Yblocks		10, 10
UpdateDist		5.0
TurnProb		0.5
SpeedChangeProb		0.2
MinSpeed		12
MaxSpeed		12
PauseProb		0.02
MaxPause		0.02

Table 2. Paramètres de simulation du protocole ESMRsc

IV.1.3.2. L'énergie consommée

La Figure 24 montre les résultats de simulation de l'énergie consommée des deux protocoles ESMRsc et ZD-AOMDV en se basant sur le modèle de mobilité Random Waypoint (WM) et sur le modèle de mobilité de Manhattan Grid (MM). Il est observé une amélioration faible de l'énergie du protocole ESMRsc par rapport au protocole ZD-AOMDV lorsque les nœuds ont une vitesse faible ou dans un réseau à faible taille (voir Figure 24.a) quand la vitesse est comprise entre 0 et 4). Cependant, lorsque le nombre de nœuds augmente et la vitesse augmente, les liens deviennent instables et le chemin devient plus long, le nombre de coupures sera augmenté et les nœuds consomment plus d'énergie, d'où l'impact de notre approche par la sélection du chemin le plus stable en matière d'énergie et de stabilité.

Nous pouvons remarquer que le protocole ESMRsc conserve l'énergie efficacement par rapport à ZD-AOMDV, par exemple lorsque le nombre de nœuds d'un réseau est 150 nœuds (voir Figure 24.b), l'énergie consommée du protocole ESMRsc est presque 19% et 12% moins que l'énergie consommée du protocole ZD-AOMDV pour les deux modèles de mobilité WM et MM. ESMRsc consomme moins d'énergie parce qu'il évite les nœuds à faible énergie et sélectionne le chemin le plus stable lors de la découverte des chemins.

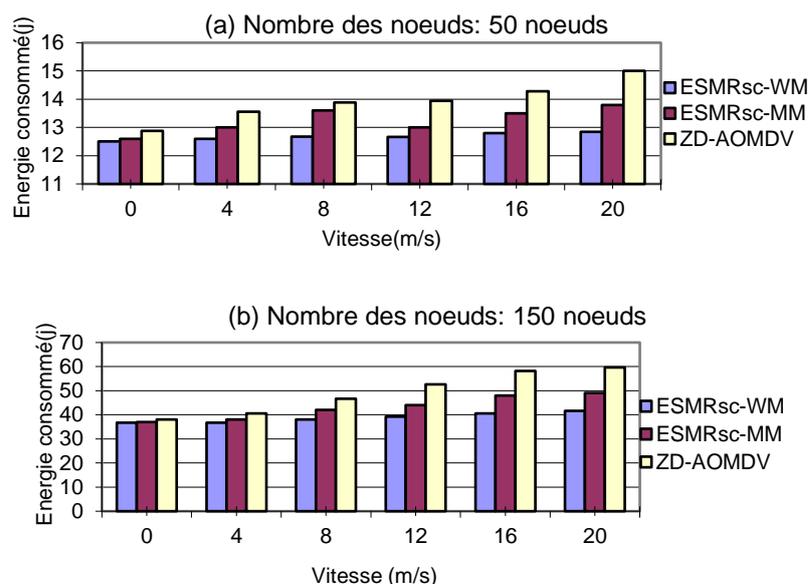


Figure 24. L'énergie consommé vs la vitesse des nœuds

IV.1.3.3. Le nombre de paquet reçue

Le nombre de paquets reçu avec succès pour des différentes vitesses est représenté dans la Figure 25. Le nombre de paquets reçu avec succès de notre protocole est meilleur que ZD-AOMDV pour les deux modèles de mobilité WM et MM. Notre protocole reçoit plus de paquets par rapport au protocole ZD-AOMDV principalement pour une taille de réseau moyenne ou élevée, ce qui assure une bonne fiabilité de notre protocole pour les modèles de mobilité aléatoires et non aléatoires. Le nombre de paquets reçu par ESMRsc pour un réseau de 150 nœuds à une vitesse de 20m/s est de 22% plus grand que ZD-ADOMV. ESMRsc sélectionne les meilleurs nœuds en matière d'énergie et de stabilité, ce qui prolonge la durée de vie des nœuds individuels et par la suite la durée de vie du chemin ainsi que du réseau, ce

qui réduit significativement le nombre de coupures des liens et contribue à l'amélioration des performances du réseau.

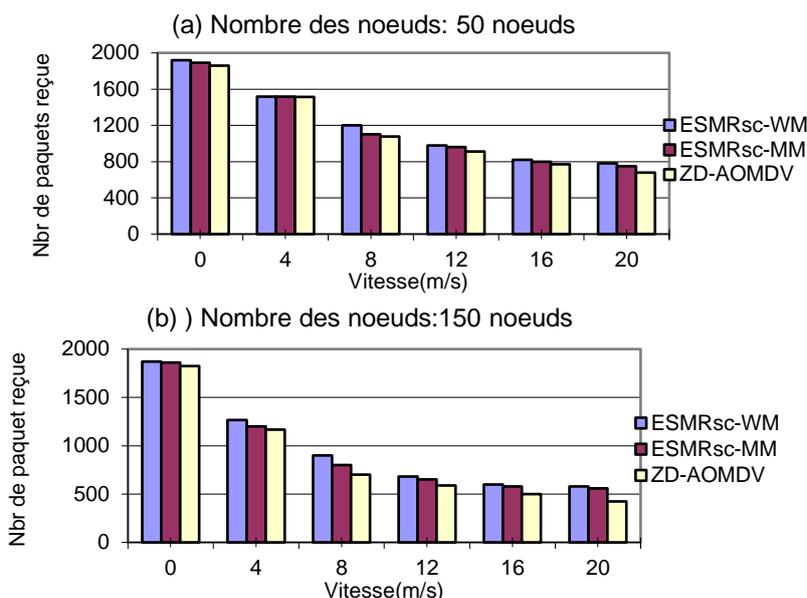


Figure 25. Le nombre de paquet reçue vs la vitesse des nœuds

IV.1.4. Discussion

Nous avons proposé un nouveau protocole de routage multi chemins ESMRsc, qui se base sur deux contraintes : l'énergie et la stabilité des liens. Notre protocole évalue les chemins trouvés durant le processus de découverte et choisir le chemin qui assure une meilleure stabilité avec une capacité énergétique maximale (des nœuds composant ce chemin). Cette solution nous permet d'augmenter la durée de vie du chemin, réduire le nombre des coupures en évitant d'un côté les liens instables qui peuvent conduire à des coupures fréquentes et les nœuds épuisés qui seront défailants. Nous avons évalué notre protocole dans un modèle de mobilité Manhattan Grid (modélise une ville) ; les résultats de simulations montrent que le protocole ESMRsc conserve mieux l'énergie par une gestion d'énergie efficace ceci augmente la durée de vie du chemin ainsi que la durée de vie du réseau.

IV.2. Le protocole ESMRua

Nous avons proposé une extension du protocole ESMRsc appelé ESMRua [19] (Efficient energy aware and Link Stable Multipath Routing Protocol in urban areas). ESMRua utilise les mêmes processus de découverte et de sélection du protocole ESMRsc qui est basé sur les deux contraintes la stabilité et l'énergie dans un milieu urbain. Nous avons conservé la même fonction du coût d'énergie qui est calculé en fonction d'énergie restante du nœud et du taux de consommation (drain rate). Notre contribution est de proposer trois formulations (variantes) pour calculer le coefficient de variation afin d'évaluer la stabilité des liens. Ces variantes sont basées sur l'écart type, l'écart absolu moyen et l'écart type exponentiel.

IV.2.1. La fonction de la stabilité

La fonction de la stabilité est similaire à celle du protocole ESMRsc [17] (notre précédente contribution), nous avons introduit un coefficient S_q qui représente un indicateur de la qualité du signal. La fonction de la stabilité est donnée par :

$$fsl_{i,j}(t) = \frac{SDl_{i,j}(t)}{Ml_{i,j}(t)} S_q \quad (22)$$

Dont $SDl_{i,j}(t)$ représente l'écart type et $Ml_{i,j}(t)$ représente la moyenne.

Nous avons utilisé trois formules basées sur le coefficient de variation pour calculer la stabilité des liens. Chaque variante a sa propre méthode de calcul. Notre objective est d'évaluer l'impact de ces trois variantes sur le routage dans un réseau ad hoc, et ceci afin de sélectionner la méthode la plus adaptée.

- L'écart type standard : défini comme la moyenne arithmétique du carré des écarts de chaque valeur de variable (la distance dans notre cas) par rapport à la moyenne. Il est plus complexe à calculer par rapport aux autres variations [96].
- L'écart type absolu moyen : est la moyenne arithmétique de la valeur absolue des écarts de chaque valeur par rapport à la moyenne. Il est facile à calculer et simple à interpréter. Il tolère mieux les valeurs extrêmes (dans le cas de distributions fortement asymétriques) contrairement au l'écart type qui est exagéré en raison de la mise au carré [97].
- L'écart type exponentiel : c'est une technique qui utilise un paramètre de poids (généralement les mesures plus récentes reçoivent un poids plus élevé que les précédentes) pour calculer l'écart type. Il se caractérise par le calcul rapide et simple dont il nécessite seulement l'ancienne valeur et la valeur actuelle contrairement aux deux variations précédentes (qui nécessitent un calcul sur n valeurs à chaque fois).

IV.2.1.1. Calcul basé sur l'écart type standard

Dans cet approche, $Ml_{i,j}(t)$ représente la moyenne des derniers n distances observées entre le nœud i et le nœud j à l'instant t , définis comme suit :

$$Ml_{i,j}(t) = \frac{\sum_{t=t_1}^{tn} d_{i,j}(t)}{n} \quad (23)$$

$SDl_{i,j}(t)$ dénote l'écart type des distances enregistrées entre le nœud i et le nœud j à l'instant t , il est donné par:

$$SDl_{i,j}(t) = \sqrt{Vl_{i,j}(t)} \quad (24)$$

Dont $Vl_{i,j}(t)$ représente la variance des distances $d_{i,j}(t)$, définie par :

$$Vl_{i,j}(t) = \frac{1}{n} \sum_{t=t_1}^{tn} (d_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t))^2 \quad (25)$$

L'écart type est le paramètre de mesure de dispersion le plus utilisé [96].

IV.2.1.2. Calcul basé sur l'écart absolu moyen

Dans cette deuxième variation, la moyenne des n distances enregistrées entre le nœud i et le nœud j est calculée exactement de la même manière que la première variation ; mais $SDl_{i,j}(t)$ est calculé d'une autre façon (l'écart absolu moyen) :

$$SDl_{i,j}(t) = Vl_{i,j}(t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |d_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t)| \quad (26)$$

Cette variation est appelée aussi MAD (mean absolute deviation).

IV.2.1.3. Calcul basé sur l'écart type exponentiel

Pour la dernière variante, $Ml_{i,j}(t)$ représente la moyenne exponentielle des n distances enregistrées entre le nœud i et le nœud j à un moment donné t , définie comme suit :

$$Ml_{i,j}(t) = \begin{cases} d_{i,j}(1) & n = 0 \\ \sigma \cdot d_{i,j}(t) + (1 - \sigma) \cdot Ml_{i,j}(t) & \text{else} \end{cases} \quad (27)$$

Où σ est compris entre 0 et 1 et dépend du nombre de distances collectées.

$SDl_{i,j}(t)$ a la même notation présentée dans la première variation, il représente la variance de l'écart type exponentiel des distances enregistrées entre le nœud i et le nœud j . $Vl_{i,j}(t)$ représente la variance exponentiel des distances $d_{i,j}(t)$, définie comme :

$$Vl_{i,j}(t) = (1 - \sigma) (Vl_{i,j}(t - 1) + \sigma \delta^2) \quad (28)$$

$$\delta = d_{i,j}(t) - Ml_{i,j}(t - 1)$$

La variance dans ce type est calculée en fonction de l'ancienne valeur en exploitant la nouvelle information (la nouvelle distance enregistrée). Il ne nécessite pas un espace de stockage des derniers n distances.

IV.2.2. La fonction objective

La fonction objective correspondante $fp_j(t)$ du chemin j à l'instant t est définie en combinant la fonction du coût de la stabilité et l'énergie, donnée comme :

$$fp_j(t) = \alpha \cdot fep_j(t) + \frac{\beta}{fsp_j(t)} \quad (29)$$

Nous notons que notre modèle peut être utilisé pour traiter de nombreuses applications en choisissant des valeurs appropriées pour les paramètres α et β . Par exemple, avec des applications qui favorisent la stabilité sur l'énergie afin d'assurer une transmission stable, on utilise des coefficients où $\alpha \gg \beta$. En fin on note que $\alpha + \beta = 1$.

IV.2.3. Evaluation des performances du protocole ESMRua

Dans cette partie, nous discutons les résultats de simulation du protocole ESMRua avec ces trois variations proposées : ESMRua-SD (l'écart type standard), ESMRua-AAD (l'écart type absolu) and ESMRua-EWMD (l'écart type exponentiel). Afin d'évaluer notre protocole et démontrer sa performance, nous avons comparé ces trois variantes de protocole avec le protocole EESMR [79] en se basant sur deux modèles de mobilité : RWP et Manhattan Grid.

Nous avons choisi trois critères de performance :

- L'énergie consommée : représente la moyenne des énergies consommées de tous les nœuds.
- Le taux de livraison de paquets PDR (Packet Delivery Rate) : est le rapport entre les paquets de données reçus par le nœud de destination et ceux qui sont transmis par le nœud source.

- Le flux de contrôle normalisé NRO (Normalized Routing Overhead) est calculé en divisant le nombre de paquets de contrôle envoyés par le nombre de paquets de données reçus lors de la simulation.

IV.2.3.1. Environnement et paramètres de simulation

Pour évaluer notre protocole ESMRua, nous avons utilisé le simulateur NS2 avec deux modèles de mobilité: le modèle Random Waypoint et le modèle Manhattan Grid. Pour le modèle de mobilité de Manhattan Grid, la probabilité de déplacement direct est de 0,5, la probabilité de tourner à gauche ou à droite est de 0,5. Chaque nœud a une vitesse aléatoire de 0 à 25m/s (incrémenté par 5 m/s). Nous avons varié les vitesses afin de prendre en considération tous les scénarios possibles : faible ou grande mobilité. Le modèle de radio partagé utilisé est similaire à la norme IEEE 802.11, basée sur le Wave LAN de Lucent. Nous avons exécuté 20 simulations pour chaque scénario, où le nœud source et le nœud de destination sont choisis au hasard. On suppose que le nœud consomme 910mW lors d'une réception d'un paquet et 1300 mW pour son émission [27], la consommation en mode veille n'est pas considérée. Le nombre de nœuds du réseau a des valeurs de 50,100 et 200. La Table 3 présente les différents paramètres de simulation.

Modèle de mobilité	Paramètre	Valeur
Random Waypoint	Simulateur	NS2, NAM 1.13
	Type du canal	Channel /Wireless channel
	Protocole de routage	EESMR/ESMRua
	Temps de simulations	250 s
	Nombre des nœuds	50/100/200
	Radio propagation model	Propagation/Two Ray Ground
	Type d'interface	Phy/WirelessPhy
	Type MAC	IEEE 802.11
	Type Interface de file d'attente	Queue/DropTail/PriQueue
	Max paquet dans ifq	100
	Surface de simulation	1000 m×1000 m
	Porté de transmission	250 m
	RREP_Wait_Time	0.5 s
	α , β	0.5 , 0.5
	S_q	$0 < S_q < 1$
Manhattan Grid	Circular	false
	Dimension du mouvement J	2D
	Xblocks , Yblocks	11, 7
	UpdateDist	5.0
	TurnProb	0.5
	SpeedChangeProb	0.2
	AvgSpeed	5,10,15,20
	PauseProb	0.05
	MaxPause	1

Table 3. Paramètres de simulation du protocole ESMRua

IV.2.3.2. L'énergie consommée (basée sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

La Figure 26 montre l'énergie consommée par les trois variantes du protocole ESMRua et EESMR utilisant un modèle de mobilité Manhattan Grid. ESMRua a une légère réduction de consommation d'énergie pour un nombre faible de nœuds et de vitesse par rapport à EESMR (dans ce cas, le protocole généralement trouve un seul chemin). Cependant, quand le nombre de nœuds augmente et que la vitesse augmente, les liens deviennent instables. La sélection du chemin le plus stable permet de réduire le nombre de coupures et le taux de paquet perdu, ce qui implique une réduction du flux de contrôle et une meilleure conservation d'énergie. Nous pouvons constater que l'énergie consommée par ESMRua est inférieure à celle consommée par EESMR et ceci pour toutes les variantes.

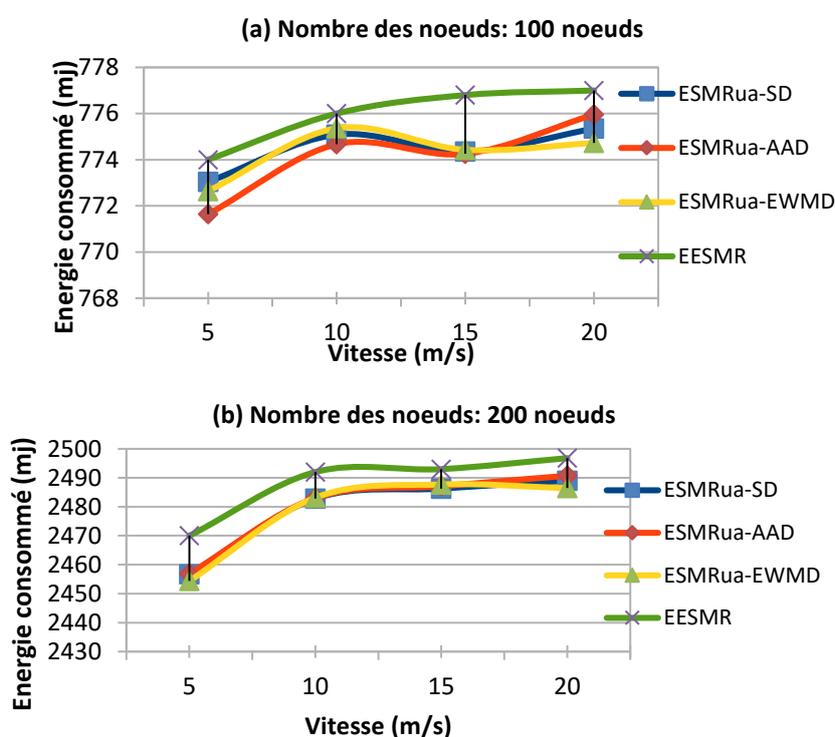


Figure 26. Energie consommé vs vitesse pour Manhattan Grid mobilité

IV.2.3.3. PDR (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

Le PDR (Packet delivery ratio) est illustré dans la Figure 27 vs différentes vitesses des nœuds. Notre protocole ESMRua améliore le taux de paquet reçu par rapport au protocole EESMR pour le modèle Manhattan Grid. Dans un réseau de 200 nœuds avec une vitesse de 20m/s, notre protocole a amélioré le taux de paquets reçus avec une valeur de PDR égale à 41% et 31% pour le protocole EESMR. Notre protocole reçoit plus de paquets que le protocole EESMR, principalement pour un nombre moyen ou élevé de nœuds du réseau. Cette amélioration est due au choix des chemins (qui s'adapte aux modèles conçus pour les villes) en matière d'énergie, de stabilité et de qualité de signal permettant d'augmenter la durée de vie du chemin et réduire le nombre de coupures.

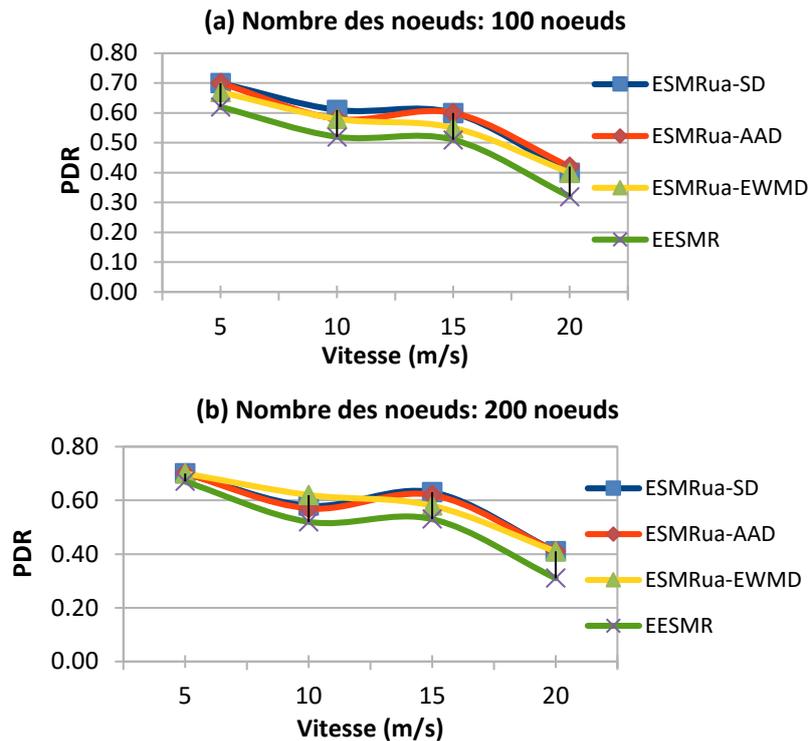
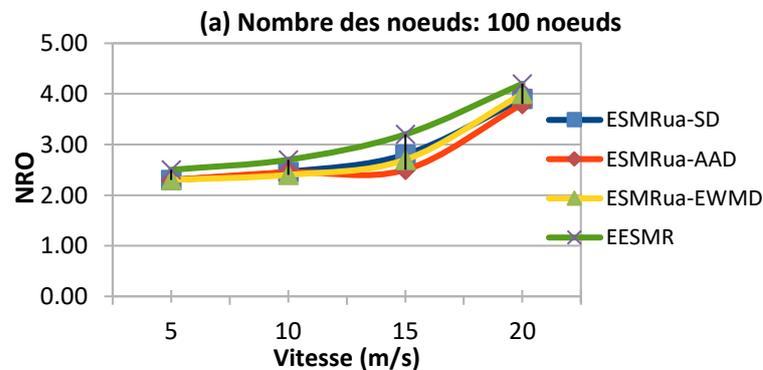


Figure 27. PDR vs vitesse pour Manhattan Grid mobilité

IV.2.3.4. Overhead (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

La Figure 28 montre NRO (Normalized Routing Overhead) qui représente le taux normalisé du flux de contrôle pour le modèle de mobilité Manhattan Grid. Dans tous les cas (différent nombre de nœuds et différentes vitesses), ESMRua fournit un gain de 20 % pour la vitesse 10m/s et 30% pour la vitesse 20m/s (voir Figure 28.b). Le NRO de EESMR est beaucoup plus élevé que le protocole ESMRua vu que le choix du chemin du protocole EESMR n'est pas optimal provoquant plus de coupure des liens causés par les restrictions urbaines, ainsi qu'il nécessite plus de paquets de routage pour maintenir la transmission des paquets de données. Notre protocole ESMRua est mieux adapté au routage dans un milieu urbain, en sélectionnant les chemins les plus stables avec une meilleure qualité de signal.



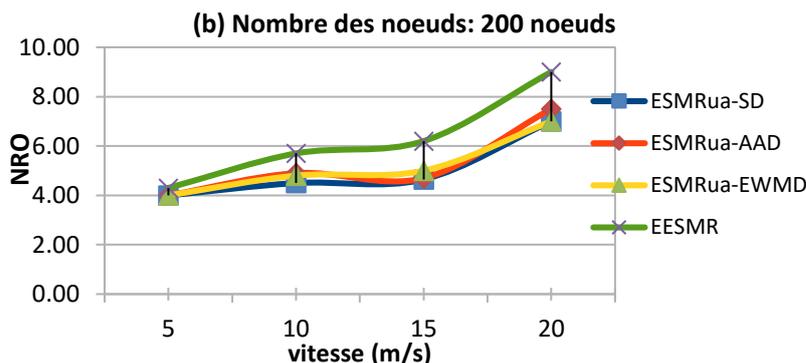


Figure 28. Overhead vs vitesse avec Manhattan Grid mobilité

IV.2.3.5. L'énergie consommée et le PDR (basés sur le modèle de mobilité RWP)

La Figure 29 montre les différentes simulations de nos trois variantes du protocole ESMRua par rapport au protocole EESMR basé sur un modèle Random Waypoint. Le protocole ESMRua a une consommation énergétique proche du protocole EESMR. Les résultats du PDR, montrent que notre protocole avec ces trois variantes a une petite amélioration en le comparant à EESMR, cette amélioration varie entre 2% et 5%. Cela indique que même dans un environnement sans restriction, le protocole EESMR est toujours plus efficace qu'ESMRua. Mais pour la mobilité non aléatoire en milieu urbain, les résultats précédents montrent que notre protocole ESMRua a de meilleures performances en matière énergétique et de PDR.

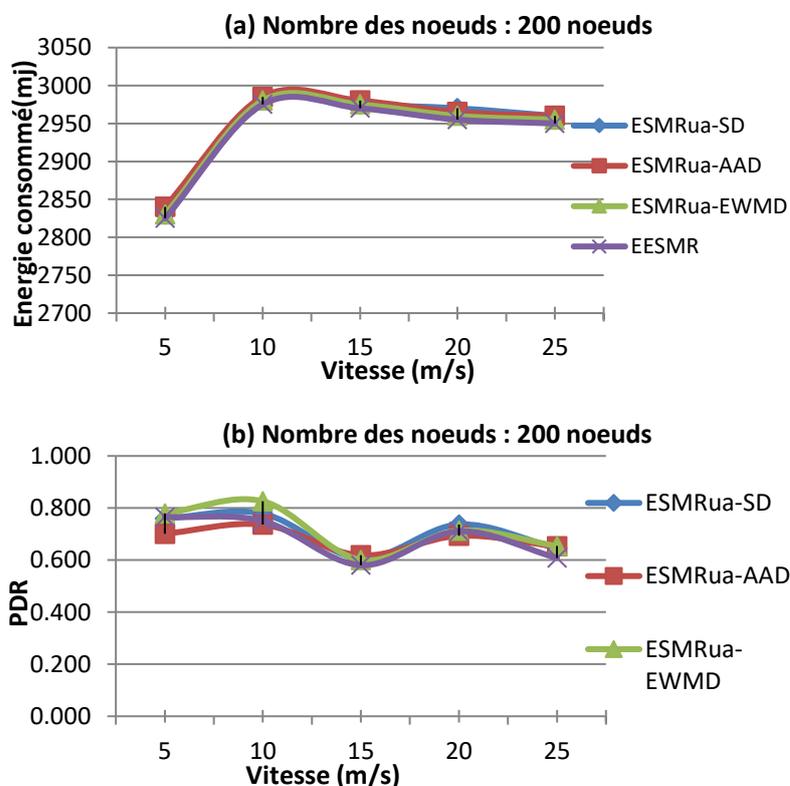


Figure 29. L'énergie consommée et PDR vs vitesse pour RWP

Finalement, nous pouvons dire en consultant les simulations effectuées qu'il y a une légère différence dans les résultats obtenus entre les trois variations proposées. Cependant, nous remarquons que la variation ESMRua-EWMD offre globalement de meilleurs résultats. De plus, ESMRua-EWMD nécessite moins de capacité de stockage et de calcul par rapport aux deux autres variations.

IV.3. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre nos deux protocoles de routage basés sur les deux contraintes énergie et stabilité. Nous avons choisi la contrainte énergie afin d'éviter les nœuds ayant une faible énergie qui peuvent quitter le réseau du fait de l'épuisement d'énergie ; cela introduit des coupures et réduit la durée de vie du réseau à long terme. De plus, la stabilité nous permet d'estimer la durée de vie d'un chemin en fonction de la mobilité en tenant compte du cas de mobilité dans un milieu urbain.

Le protocole ESMRsc combine les deux contraintes d'énergie et stabilité afin d'assurer la fiabilité et améliore la performance du réseau, surtout dans un milieu urbain. La comparaison de ce protocole avec le protocole ZD-AOMDV montre que le protocole proposé conserve l'énergie des nœuds ce qui augmente la durée de vie du réseau.

Une extension a été proposée nommée ESMRua, adoptant la même approche que le protocole ESMRsc, mais utilise trois variations d'évaluation de la stabilité. Un nouveau coefficient S_q est défini indiquant la qualité du signal. Les paramètres α et β sont introduits afin d'ajuster le poids des contraintes stabilité et énergie suivant les besoins de l'application. Nous avons choisi pour évaluer notre proposition, le protocole EESMR qui est un protocole de routage multi chemins basé sur les deux contraintes énergie et stabilité. Les résultats montrent que les deux protocoles EESMR et ESMRsc fournissent des performances similaires dans le modèle RWP. Cependant, le protocole ESMRsc améliore significativement le taux de paquet reçu et le taux de message de contrôle dans le modèle Manhattan Grid conçu pour les milieux urbains.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire les notions du signal pour les réseaux sans fil ainsi qu'un état de l'art des différents estimateurs de qualité du lien existants dans la littérature qui sont utilisés pour estimer et évaluer la qualité du lien. Il représente un élément intéressant qui doit être impliqué dans la décision de routage principalement dans les milieux urbains.

CHAPITRE V

Routage dans les milieux urbains

V.1. Introduction

Un protocole de routage doit répondre aux caractéristiques du réseau MANET. Nous avons présenté dans le chapitre 3 deux contraintes importantes qui provoquent des coupures de communication dans les réseaux MANET : l'énergie et la stabilité (lié à la mobilité). Comme n'importe quel réseau sans fil, le réseau sans fil mobile est très sensible à des problèmes liés au signal qui peut être affecté directement par des événements internes (interférences) ou externes (l'environnement tel que le bruit). Par conséquent, les liaisons radio sont moins fiables et peuvent changer d'une manière imprévisible à tout moment.

Dans la réalité, la nature d'un environnement urbain peut être considérée comme bruyante dont le taux de bruit est plus élevé en le comparant à un environnement d'espace libre. De plus, la présence des obstacles va augmenter le taux de défaillance des liens entre les nœuds. Cela va dégrader la performance du protocole de routage qui ne prend pas en considération la qualité du signal. En effet, et afin d'offrir de meilleures performances d'un protocole de routage dans un environnement réel, il est indispensable de prendre la contrainte de qualité du signal en considération dans le processus d'évaluation et de sélection des chemins.

Dans ce contexte, les chercheurs ont proposé des estimateurs de qualité (LQE : Link Quality Estimator) pour mesurer et estimer la qualité du signal. Ces estimateurs sont classifiés en deux classes : physique (hardware-based) et logique (software-based) ([98],[99]).

Nous présentons dans ce chapitre des notions sur la transmission radio et les causes de perte du signal. Ensuite, nous illustrons la classification des LQE en discutant les différentes métriques de qualité proposée dans la littérature. Enfin nous présentons pour chaque catégorie des LQEs quelques protocoles de routage associés.

V.2. Notion de transmission radio

Dans cette section, nous présentons un ensemble de notions fondamentales de la transmission dans la communication sans fil. La portée de la transmission dans un réseau sans fil est limitée, cette zone de transmission est divisée en trois régions ([100],[101]):

- Région connectée (connected region): représente la région ayant une bonne qualité du lien, stable avec un taux de livraison élevé.
- Région déconnectée (disconnected region): représente la région ayant une mauvaise qualité du lien, instable avec un taux de livraison très faible. Les liens de cette région doivent être évités durant la transmission des données.
- Région transitionnelle (transitional region): représente la région intermédiaire ; la qualité des liens dans cette région est moyenne, les liens sont instables et sensibles dont la qualité peut diminuer significativement. C'est la région la plus grande.

V.2.1. Phénomènes de propagation radio

Les ondes subissent plusieurs phénomènes qui sont liés à l'environnement (indoor, urbain, espace libre, etc.) et à la mobilité de l'émetteur et le récepteur. Ces phénomènes ont un grand impact sur la puissance et la qualité du signal reçue. Dans ce qui suit, nous allons décrire les principaux phénomènes qui peuvent se produire dans la communication sans fil ([3], [102]) :

- **Transmission** : permet aux ondes de traverser un obstacle (particulièrement pour l'environnement indoor). La plupart des matériaux de construction présents actuellement introduisent un affaiblissement de l'onde transmise suivant certains paramètres tels que l'épaisseur de l'obstacle.
- **Diffraction** : ce phénomène provient quand l'onde rencontre l'arête d'un obstacle de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde. Il permet aux ondes radioélectriques de se propager même si la source et la destination ne sont pas en visibilité directe à partir des limites de cet obstacle avec une atténuation importante.
- **Diffusion** : c'est une réflexion particulière, quand l'onde rencontre des particules de petite taille (par rapport à la longueur d'onde). Il correspond à la superposition d'un grand nombre de diffractions aléatoires dans différentes directions avec des atténuations variantes.
- **Réflexion** : quand l'onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à la longueur d'onde (comme le sol). Il existe deux types de réflexion suivant la surface de l'obstacle : la réflexion diffuse (surface irrégulière) et la réflexion spéculaire (surface lisse dont l'onde se réfléchit comme un rayon lumineux).

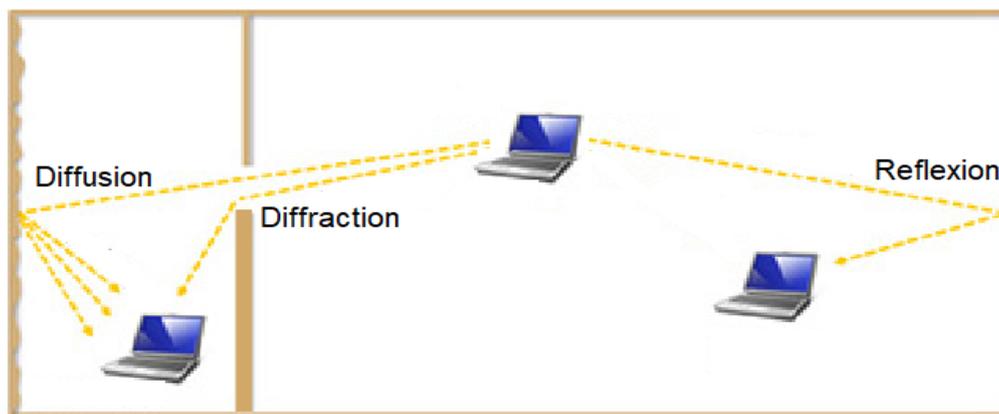


Figure 30. Les phénomènes de propagation radio

V.2.2. Causes de dégradation du signal

La propagation des signaux radio est affectée par plusieurs facteurs qui dégradent la qualité du signal. Comme nous avons vu, les ondes radio sont diffractées, diffusées ou réfléchies au fur et à mesure que l'onde se propage à travers le milieu, ce qui entraîne une diminution de la puissance du signal avec la distance. Les facteurs environnementaux liés aux phénomènes de propagation comprennent l'affaiblissement du trajet (path-loss), l'évanouissement (fading), les interférences et le bruit ([102],[103]).

- **L'affaiblissement du chemin (Path loss) :** ce sont les variations qui représentent l'affaiblissement du signal lié à la distance entre l'émetteur et le récepteur. Il dépend de l'environnement (urbain, espace libre ...).
- **L'évanouissement (Fading) :** ce sont les variations à petite échelle qui représentent les fluctuations rapides du signal sur une petite distance ou dans un temps court, qui sont dues aux phénomènes suivants:
 - interférences entre les différents chemins multiples, causés par les phénomènes de propagation telle que la réflexion, la réfraction des signaux, etc.
 - shadowing, est un autre type dont les variations sont à grande échelle. Ils sont liés aux différentes interactions avec les obstacles conduisant à la création de zones d'ombre (évanouissement profond) et affectent considérablement le signal.
- **Interférence :** c'est un autre facteur important qui reflète la présence des transmissions concurrentes (plusieurs signaux indépendants et simultanés ayant des fréquences très proches).
- **Bruit (Noise) :** correspond à tout phénomène qui perturbe et se superpose au signal original (généralement, des signaux externes) [104].

En raison des causes citées ci-dessus, les protocoles de routage peuvent devenir instables en raison d'un taux de paquets perdus élevés, des retransmissions et de l'instabilité des chemins ce qui a un impact négatif sur la performance du réseau.

V.3. Qualité du signal sans fil

Les réseaux ad hoc mobiles utilisent des signaux radio pour transmettre les messages dans le réseau. Nous avons vu que la propagation des signaux subit un certain nombre de phénomènes rencontrés durant les transmissions sans fil comprenant la réflexion, la diffusion et la diffraction. D'autres facteurs peuvent affecter le signal tel que la présence de bruits générés par des éléments externes du réseau, ainsi que l'interférence.

Dans un environnement urbain, la qualité du signal est de plus en plus sensible et peut faire l'objet d'une dégradation significative à cause de la nature de l'environnement. Une zone urbaine comme une ville se compose d'un ensemble de blocs contenant des immeubles ou des bâtiments (espace indoor), un ensemble de rues engendre la majorité du mouvement et des différents objets. Tous ces éléments représentent des obstacles qui affectent le signal. De plus, un milieu urbain comporte plusieurs sources de signaux externes qui représentent un bruit pour notre réseau. Cet environnement dynamique conduit à des changements imprévisibles au signal. Parmi les problèmes d'une liaison sans fil est que cette liaison peut être asymétrique (le lien à une extrémité ne peut pas avoir toujours la même qualité que l'autre ; i.e. ce n'est pas forcément que la qualité du lien directionnel de A vers B égale à la qualité du B vers A).

Donc, et afin de réduire les effets des variations des liaisons sur la fonctionnalité des protocoles de routage, il est impérativement nécessaire de prendre en compte la qualité du signal dans la conception d'un protocole de routage et l'impliquer dans le processus d'évaluation ou de critère de filtrage des chemins. Nous avons discuté précédemment les

causes de perte des liens principalement la mobilité et l'énergie. Cependant, dans un tel environnement, même si nous avons des nœuds stables (pas de mobilité) dont la durée de vie sera plus grande, l'impact des phénomènes de propagation du signal peut rendre les liens instables, conduisant à des coupures de liens et des interruptions de transmission. Ces effets réduisent la fiabilité du protocole de routage et dégradent la performance du réseau.

En effet, la qualité de la liaison sans fil doit être évaluée en permanence via un processus connu. Dans ce contexte, les chercheurs ont introduit des estimateurs de qualité nommés LQE (Link Quality Estimator) pour estimer la qualité sur la base de plusieurs propriétés.

V.3.1. Estimateur de qualité de signal (LQE)

Les signaux radio sans fil subissent un certain nombre d'effets de propagation qui compliquent l'estimation de la qualité de la liaison vu qu'ils sont généralement inconnus, imprévisibles (changement rapide) et difficiles à estimer. L'évaluation des liens est nécessaire pour assurer une transmission robuste et fiable permettant aux protocoles réseau d'éviter le problème du manque de fiabilité du signal.

V.3.1.1. Définition d'un LQE

Mesurer la qualité de la liaison dans les réseaux sans fil est une tâche difficile à cause de plusieurs raisons telles que la nature du support de transmission sans fil et l'environnement. Il n'existe pas une définition standard de l'estimateur de la qualité du signal ni une unité de mesure standard (peut-être une probabilité, une valeur quantitative...).

L'estimation de la qualité d'un lien consiste à évaluer une métrique dans une fenêtre bien déterminée soit en matière de temps (en second) ou sur la base du nombre de paquets (reçus ou envoyés) pour quantifier la qualité d'un lien. La métrique générée est appelée LQE ; l'estimation peut être effectuée basant sur plusieurs paramètres : le taux de livraison, l'asymétrie, la puissance de signal, stabilité, etc. [100].

Nous pouvons considérer la qualité du lien comme une description qualitative ou quantitative du lien qui reflète sa fiabilité [105].

V.3.1.2. Que doit assurer un LQE

Les LQEs doivent correctement prévoir et estimer la qualité du lien afin de garantir une meilleure fiabilité de transmission. Une mauvaise décision entraîne des pertes de paquets et des changements au niveau de la topologie du réseau (très coûteux).

Un bon estimateur de qualité doit répondre aux points suivants [103] :

- Robustesse : par un taux de livraison avec succès très élevé.
- Précision : la qualité du lien doit être évaluée correctement en fonction de l'état du lien (estimée en temps réel et d'une manière efficace la qualité).
- Consommation d'énergie : l'énergie est une contrainte majeure des réseaux sans fil. Une métrique de qualité doit minimiser le flux de contrôle et la consommation d'énergie.
- Stabilité : la qualité du lien doit éviter les fluctuations du lien à court terme afin d'augmenter la durée de vie du lien et du chemin vu que l'opération de redécouverte

sera très coûteuse. La topologie de routage doit rester stable en présence de variations de qualité de liaison à court terme.

- Complexité : il ne requit pas des capacités de calcul ou de stockage important.

V.3.1.3. Processus de calcul LQE

Le processus d'estimation de la qualité de liens repose sur trois étapes : surveillance du lien, calcul du lien, évaluation de la métrique. La première étape définit la stratégie pour avoir du trafic sur le lien permettant des mesures du lien en observant les signaux reçus durant un intervalle de temps (appelé monitoring). Il existe trois types de surveillance ([100],[103]):

- Active : le nœud surveille les liens avec ses voisins par la diffusion des messages (appelé probs) périodiquement sur de courtes périodes pour estimer la qualité de chaque liaison. Cette diffusion peut être effectuée en broadcast (n'implique aucune retransmission ou accusée de réception) ou en unicast. La majorité des protocoles utilise la diffusion en broadcast qu'il introduit un flux de contrôle faible comparant par la diffusion en unicast. Ce type introduit un surcoût supplémentaire du flux de contrôle ce qu'augmente la consommation d'énergie et produit des congestions dans le réseau.
- Passive : Contrairement à la surveillance active, elle exploite le trafic existant et estime la qualité des liens sur la base des informations reçues (c'est le type le plus courant). Aucun surcoût supplémentaire n'est introduit. Cependant, nous pouvons avoir une estimation impropre à cause du manque d'informations récentes.
- Hybride : c'est un type hybride qui combine la surveillance de liaison active et passive permettant d'équilibrer le surcoût énergétique et la fraîcheur des mesures de liaison.

Les mesures de liaison sont effectuées par les informations extraites à partir des paquets bien reçus. Certaines informations sont capturées directement telles que : RSSI (Received Signal Strength Information), LQI (Link Quality Indicator) ; d'autres sont calculées à partir des informations contenues dans le paquet tel que : le délai de bout en bout, le nombre de retransmissions Ensuite, une technique sera appliquée aux valeurs obtenues pour estimer la qualité du lien comme : la moyenne, écart-type, logique de flou... Certaines métriques de qualité sont mesurées côté récepteur (destination) et d'autres côtés expéditeurs (source).

Dans la partie suivante, nous décrivons brièvement les principaux estimateurs de qualité LQE qui sont classifiés en deux catégories : physique et logique.

V.4. Classification des estimateurs de qualité du lien

En général, les métriques LQE présentées dans la littérature peuvent être classées comme étant physique ou logique, appelée aussi hardware ou software respectivement. La première catégorie et comme son nom l'indique, fournies directement par le matériel radio. Mais les métriques logiques sont obtenues à partir des couches supérieures. La Figure 31 représente la classification des métriques LQE ([99], [101]).

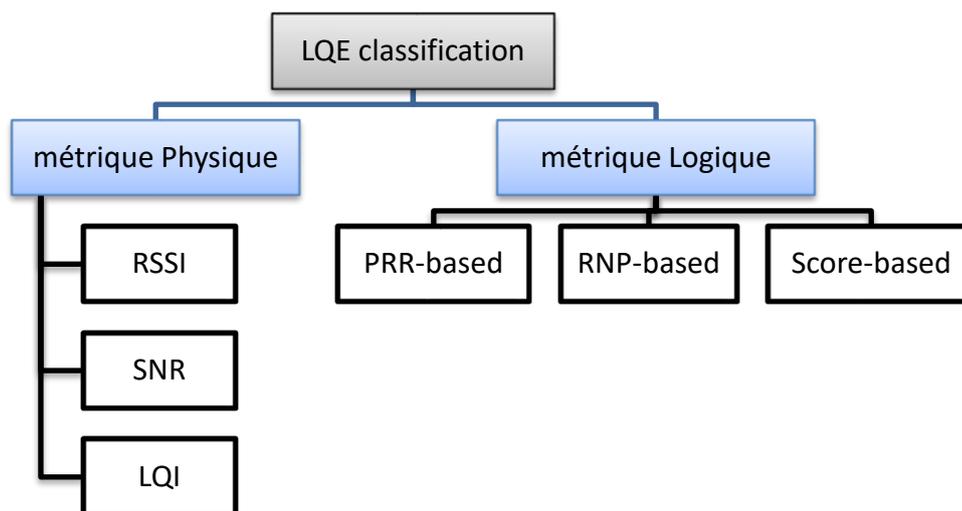


Figure 31. Classification des LQEs

V.4.1. Métriques LQE physiques

Les métriques de qualité physique (appelées aussi hardware-based) sont dérivées directement de la couche physique ; les métriques les plus courantes de cette classe sont : LQI, RSSI et SNR.

V.4.1.1. Définitions

- **RSSI (Received Signal Strength Indicator)** : il définit la puissance du signal du paquet reçu (en dBm). La plupart des interfaces radio fournissent un registre RSSI qui fournit la valeur de puissance du signal du paquet reçu. Les valeurs RSSI observées peuvent être traduites dans une plage spécifique, suivant les spécifications des différentes interfaces sans fil [101].
- **SNR (Signal Noise Ratio)** : définit la différence entre la puissance du signal et le bruit. Le SNR peut être estimé à partir de la valeur du registre RSSI pendant la transmission du paquet ; le bruit est mesuré lorsque le canal est libre (aucune transmission en cours). Le SNR fournit une meilleure précision que le RSSI car il prend compte du bruit [106].
- **LQI (Link Quality Indicator)** : fournit des informations sur la qualité du signal. Cette métrique est proposée dans la norme IEEE 802.15, mais aucune formulation définitive de sa plage de mesure ou de son calcul n'est donnée. Donc, il s'agit d'une métrique spécifique au fabricant. Une étude [101] exprime la plage de cette métrique entre 0 et 255. Dans un autre type d'interface radio (CC2420), la valeur du LQI est mesurée sur la base des huit premiers symboles du paquet reçu sous la forme d'un score allant de 50 à 110 (les valeurs les plus élevées sont les meilleures) [107].

V.4.1.2. Discussion

L'avantage principal des métriques physique est qu'ils ne nécessitent aucun calcul supplémentaire, car elles sont extraites directement du matériel. Elles peuvent donc fournir une méthode rapide et moins coûteuse (du point de vue du calcul et de l'espace mémoire) pour évaluer de la qualité des liens. Elles peuvent fournir une estimation rapide des liens de

haute qualité (de la région connectée). Néanmoins, certaines métriques physiques telles que RSSI et LQI n'ont pas une échelle standard dont ils sont soumis au fabricant. Par conséquent, il est possible qu'elles soient fournies dans différentes unités de mesure (certains fabricants fournissent le RSSI au format décibel, tandis que d'autres le fournissent en pourcentage ou en unités allant de 0 à *RSSI_Max*) [105]. De plus, les métriques physiques ne fournissent pas une évaluation précise de la qualité du lien pour plusieurs raisons, premièrement : ces métriques ne sont mesurées que pour les paquets reçus avec succès ; alors, ils peuvent surestimer la qualité du lien en ignorant les informations des paquets perdus ; deuxièmement : ils sont capables de classer la qualité en bonne, intermédiaire et mauvaise, mais elles ne fournissent pas une estimation précise de la qualité des liens surtout dans la région transitionnelle dont la valeur estimée peut augmenter ou diminuer rapidement en raison d'un changement soudain [101]. Plusieurs études ([101], [108],[98]) ont prouvé que les métriques physiques ne donnent pas une bonne corrélation avec le taux de livraison des paquets reçus pour les liens intermédiaires dont une grande valeur de RSSI [109] ne reflète pas une bonne qualité (la présence d'interférence ou de la congestion).

Malgré les limites des métriques physiques, cela ne signifie pas qu'elles sont inadéquates pour évaluer la qualité du lien. Elles ont un grand avantage où ils sont capables de donner une évaluation rapide et même déterminer les bons liens. Chacune des métriques physiques fournit une information particulière sur l'état du lien. Pour avoir de meilleurs résultats, elles peuvent être combinées avec d'autres métriques.

V.4.1.3. Protocoles de routage basé sur les métriques LQE physiques

Les auteurs du papier [14] ont proposé deux techniques de prédiction basées sur la métrique RSSI. Les techniques restreignent la transmission des paquets de contrôle aux seuls nœuds qui satisferont certains critères en utilisant deux modèles : un modèle de zone et un modèle de segment. Le modèle de zone divise la zone de transmission en trois zones : intérieure, intermédiaire et extérieure basée sur la métrique RSSI en utilisant deux seuils (minimal et maximal) dont seuls les nœuds de la zone intermédiaire retransmettre le message de diffusion. Le deuxième modèle est une amélioration du premier dans le cas où le nombre de nœuds dans la zone intermédiaire est faible, il autorise les nœuds de la zone extérieure de participer dans le processus de découverte. Les deux techniques sont intégrées dans les protocoles AODV [31] et DSR [30]. Les résultats montrent que le nombre de paquets d'erreurs est minimisé. Néanmoins, une très légère amélioration est observée sur le surcoût et la bande passante pour la version AODV. Les auteurs ne discutent pas les paramètres de taux de la livraison de paquets ou de taux de perte de paquets et n'évaluent pas le modèle dans un scénario à faible vitesse.

Une étude [109] propose un modèle de prédiction de qualité du lien LQP (Link Quality Prediction) par l'analyse de la métrique SNR des liens voisins en utilisant un échantillonnage SNR basé sur la méthode de Gray ; ce modèle est implémenté sur le protocole de routage OLSR [28]. L'évaluation du protocole est effectuée dans un seul scénario qui comporte neuf nœuds statiques. Les résultats obtenus montrent que le modèle améliore certaines

performances du réseau. Cependant, le protocole OLSR-LQP présente une légère amélioration par rapport aux autres protocoles comme OLSR-ETX en matière du PDR et délai de bout en bout. De plus, il n'est pas évalué que sur un cas précis : neuf nœuds statiques où seulement le nœud de destination qui se déplace.

V.4.2. Métriques LOE logiques

Les métriques logiques (appelées aussi software-based) sont mesurées par les couches supérieures, généralement par des méthodes statistiques puisqu'elles sont estimées dans une fenêtre (appelée window). La fenêtre peut être un intervalle de temps fixe ou un nombre déterminé de paquets. Comme il est illustré dans la Figure 31, les métriques logiques peuvent être classées en trois catégories : basée sur PRR (Packet Reception Ratio), basée sur RNP (Required Number of Packet retransmissions) ou basée sur un score.

V.4.2.1. PRR-based

La métrique PRR (Packet Reception Ratio), similaire au PDR (Packet Delivery Rate), est le rapport des paquets reçus avec succès sur le nombre de paquets envoyés sur une fenêtre w . C'est un estimateur côté récepteur, simple à mesurer et largement utilisé dans les protocoles de routage. PRR est largement utilisée dans les recherches pour évaluer la fiabilité des métriques de qualité physique (par l'étude de la corrélation de ces métriques avec PRR) [99].

V.4.2.2. RNP-based

La métrique RNP (Required Number of Packet retransmissions) compte le nombre moyen de transmissions/retransmissions de paquets nécessaires avant une réception réussie. C'est un estimateur côté expéditeur qui calcule le nombre de paquets transmis et retransmis au cours d'une fenêtre définie divisée par le nombre de paquets bien reçus, moins 1 (pour exclure la première transmission de paquet) ([101],[99]). RNP utilise généralement une surveillance passive en diffusant périodiquement des paquets de contrôle pendant une courte durée.

Une autre métrique souvent utilisée dans cette catégorie qui est ETX (Expected Transmission Count). ETX évalue le nombre moyen de transmissions et de retransmissions nécessaires pour envoyer un paquet de données en tenant compte l'asymétrie des liens. C'est un estimateur côté récepteur. Le calcul de ETX utilise l'inverse du produit de deux paramètres : le taux de livraison directe df (forward delivery) (i.e. d'un nœud émetteur A vers B) et le taux de livraison inverse dr (reverse delivery) (du nœud B vers A) du lien ([110], [111]).

V.4.2.3. Score-based

Les métriques basées sur le score fournissent une estimation du lien qui ne fait pas référence à un phénomène physique, elles fournissent plutôt un score ou une étiquette qui évalue la qualité du lien et le définissent dans une certaine plage. Généralement, une métrique basée sur le score permet de combiner plusieurs métriques afin d'améliorer la précision d'estimateur.

V.4.2.4. Discussion

Les métriques logiques peuvent être soit simples, c'est-à-dire basées sur une seule métrique (comme PRR, RNP et ETX), soit composée (score) basée sur la combinaison de plusieurs métriques. Contrairement aux métriques physiques qui sont instables en raison de divers effets de propagation, plusieurs recherches ([100],[105]) ont trouvé que les métriques logiques offrent des améliorations de performance du réseau. Un autre avantage de ces métriques est qu'elles sont complètement indépendamment de la spécificité matérielle.

Cependant, les métriques logiques requièrent un flux de paquets déjà transmis afin de mesurer la qualité du lien ; la précision de ces métriques dépend de la taille de la fenêtre utilisée. La taille de la fenêtre est un paramètre important pour assurer une estimation plus fiable : d'un côté, le choix d'une fenêtre de petite taille peut surestimer la qualité et réduire sa fiabilité et d'un autre côté, le choix d'une fenêtre de grande taille améliore l'estimation de la qualité, mais nécessite un temps de convergence important. De plus, elles nécessitent la transmission périodique du flux (surveillance passive ou active) pour maintenir la qualité des liens ce qui représente un coût supplémentaire des ressources du réseau en matière : énergie des nœuds, de la bande passante, de flux de contrôle. Ce coût devient très volumineux dans la surveillance active ; pour cela, la plupart des recherches utilisent la surveillance passive afin de minimiser le surcoût.

Les métriques basées sur PRR et RNP ont certains inconvénients. Une étude [106] prouve que la métrique PRR ne peut pas différencier entre les liaisons stables et les instables (une liaison est instable si un changement mineur de l'environnement dégrade le taux de livraison) où une dégradation soudaine ne peut être que mesurée. Les métriques basées sur RNP ont l'inconvénient d'être instables et ne peuvent pas estimer de manière fiable le PDR, principalement en raison de l'asymétrie des liaisons (si un nœud a un lien asymétrique vers un nœud voisin, il nécessite parfois d'effectuer beaucoup de retransmissions en raison de la faible qualité de sa liaison inverse, alors que la qualité de transmission des données de sa liaison directe est bonne).

Actuellement, les chercheurs ([98],[112]) ont conclu qu'une estimation précise et stable de la qualité des liens ne peut pas être obtenue uniquement par une métrique composée. Les LQE à métrique unique que ce soit physique ou logique évaluent une propriété du lien particulière. Cependant, les LQE composées fournissent une estimation solide des liens en combinant plusieurs métriques [98]. De ce fait, il est recommandé d'utiliser une métrique composée ou d'avoir un nouveau LQE en tenant compte des différentes propriétés de la qualité du lien. Cette métrique nous permet d'assurer une évaluation efficace et fiable de la qualité qui répond aux différents changements dans l'environnement.

V.4.2.5. Protocoles de routage basé sur les métriques LQE logiques

Nous avons vu précédemment que la métrique PRR est instable où les petits changements (dans l'environnement) peuvent dégrader significativement la valeur de cette métrique ce qui conduit à une mauvaise estimation qui affecte les performances du réseau. Pour dépasser cet inconvénient, une amélioration du PRR a été introduite dans Window Mean avec EWMA

(WMEWMA) [113], qui est un estimateur de qualité simple basé sur la métrique PRR côté récepteur. Il repose sur le concept de la surveillance passive afin d'éviter le surcoût. WMEWMA applique un filtre EWMA (The Exponentially Weighted Moving Average) pour estimer la qualité de la liaison en fonction du PRR actuel enregistré et du PRR précédent (historique) afin de filtrer sa fluctuation transitoire. En regardant les résultats, la nouvelle métrique fournit une estimation plus stable qui a une certaine résistance aux fluctuations du PRR. WMEWMA dépasse d'autres filtres tels que TWMA (Time Weighted Moving Average), le moyen mobile (Moving Average) et EWMA.

Une nouvelle méthode de calcul de la métrique de qualité a été proposée basée sur la métrique standard ETX, appelée ETX_ANT (ETX anticipation) [110]. L'idée fondamentale de cette proposition est de prédire la qualité à l'avance, afin de compenser le retard impliqué par la mesure de la qualité du lien et sa diffusion par le protocole de routage. Cette technique est basée sur des mesures de puissance du signal RSSI et déduit le futur taux d'erreur de trame (la probabilité que la transmission d'une trame échoue). Un seuil est défini pour définir si la qualité d'un lien est bonne ou non. Les métriques ETX et ETT sont utilisées sous leurs formes classiques lorsque la qualité du lien est bonne (une qualité supérieure au seuil défini). Dans le cas contraire, la valeur du futur taux d'erreur de trame déduite est exploitée pour estimer la valeur de la nouvelle métrique ETX_ANT. La nouvelle métrique améliore les performances du réseau en matière de PDR et du délai de bout en bout. Cependant, la contribution elle-même est basée sur la valeur de la métrique ETX qui est instable dans certaines situations et incapable de différencier entre les liens ayant différentes capacités (telle que la bande passante).

La métrique ETX prend en considération seulement le taux de perte de paquets en matière de nombre de transmissions requises pour bien recevoir un paquet. L'un des inconvénients de la métrique ETX est qu'il ne peut pas différencier entre les liens ayant la même valeur de qualité. Une nouvelle version de cette métrique a été proposée [114], appelée ETT (Expected Transmission Time) qui prend en considération d'autres caractéristiques des liens (la bande passante et le volume de donnée) et favorise le chemin de haut débit. Le calcul d'ETT est basé sur la métrique ETX avec la prise en compte de la taille des paquets et du débit du lien. ETT peut être définie comme le délai prévu de transmission d'un paquet suivant la bande passante disponible [115]. La métrique ETT améliore les performances d'ETX par l'intégration du débit et du volume de données. Cependant, ETT garde une conception similaire que ETX ; donc elle a les mêmes problèmes (l'asymétrie des liens qui peut sous-estimer la qualité et l'instabilité de la métrique).

F-ETX (Fast ETX) [116] est une autre amélioration de la métrique ETX pour résoudre les limites de cette dernière. Pour améliorer la détection de la métrique ETX, deux approches sont possibles : la première méthode consiste à réduire l'intervalle d'envoi ; mais cette méthode augmente le flux de contrôle (overhead) et surcharge le réseau. La deuxième méthode consiste à utiliser différentes tailles de fenêtre. La métrique F-ETX utilise une taille de fenêtre dynamique pour évaluer les liens et éviter les limitations de la taille des fenêtres statiques. De plus, cette métrique n'est pas limitée à l'estimation de la qualité du lien, mais apporte également une information sur la stabilité du lien. L'objectif est de fournir un équilibre entre une convergence rapide et une bonne précision. Les expérimentations ont

montré que F-ETX a une bonne distribution des valeurs de la métrique par rapport à ETX qui utilise une taille de fenêtre fixe. En conséquence, F-ETX offre une meilleure précision pour estimer la qualité que la métrique ETX standard. Une extension du F-ETX [117] a été proposée en le combinant avec l'un des indicateurs complémentaires proposés: la tendance de la qualité du lien (qui permet d'évaluer l'évolution de la qualité en fonction de l'estimation actuelle et précédente), la stabilité du lien ou un indicateur sur le niveau d'un lien unidirectionnel (qui est utilisé pour la détection des liens bidirectionnels devenant unidirectionnels). Ces indicateurs fournissent des informations supplémentaires sur les états des liens pour prédire leurs caractéristiques.

La métrique 4bit [118] n'est pas seulement une métrique de la qualité des liens, mais elle est conçue aussi pour être exploitée par les protocoles de routage en fournissant quatre bits d'information de différentes couches. Le premier bit (appelé « bit blanc ») est extrait de la couche physique ; il permet d'identifier rapidement des liens de bonne qualité à partir d'un seul paquet reçu. Le deuxième bit (appelé « bit d'accusé de réception ») provient de la couche liaison et indique si un accusé de réception est reçu pour un paquet envoyé. Le troisième bit (appelé « bit pin ») s'applique aux entrées de la table des voisins. Enfin, le quatrième bit (appelé « bit comparé ») indique si le chemin fourni par la source du paquet est meilleur que le chemin fourni par une ou plusieurs entrées de la table de routage. Un estimateur hybride combine les quatre informations pour évaluer la qualité du lien en appliquant le filtre EWMA. 4bit calcule l'ETX nécessaire pour définir le bit d'accusé de réception et évalue la qualité du lien dans les deux sens simultanément (direct et inverse). La comparaison montre que 4bit performe mieux que la métrique LQI. Néanmoins, une telle comparaison est insuffisante pour tester la stabilité et la performance de cette métrique.

Nous savons que la qualité d'un lien ne peut pas être estimée en se basant sur les métriques uniques, car une métrique ne représente qu'une caractéristique particulière du lien. Les recherches récentes s'intéressent à la combinaison des métriques de qualité.

F-LQE (Fuzzy Link Quality Estimator) [99] est un estimateur de qualité côté récepteur de type score qui estime la qualité du lien sur la base de quatre propriétés de qualité du lien: PDR (livraison de paquets), asymétrie (la différence absolue de PRR au sein du lien direct et le lien inversé entre deux nœuds), la stabilité (coefficient de variation du PRR sur les 30 derniers paquets) et la qualité du canal (en fonction du SNR). Ces propriétés sont définies en termes de langage naturel (élevé ou faible) et combinées à l'aide de la logique floue pour exprimer la qualité du lien. F-LQE applique le filtre EWMA pour fournir des estimations de qualité de liens stables. Le score du F-LQE varie entre 0 et 100 dont la valeur 100 représente la meilleure qualité du lien et 0 est la plus mauvaise qualité. Les résultats d'expérimentation montrent que F-LQE obtient de bonnes performances en termes de fiabilité et de stabilité par rapport à plusieurs métriques de qualité telle que PRR, WMEWMA, ETX et RNP. Cependant, les métriques de qualité utilisées dans la comparaison sont des métriques uniques incapables d'évaluer qu'une seule propriété du lien. En outre, F-LQE a une complexité de calcul plus élevée.

Un nouvel estimateur est proposé nommé WRE (Weighted Regression Estimator) [119]. L'idée est basée sur la corrélation spatiale de la qualité des liens entre un nœud et ses nœuds

voisins dont la qualité d'un lien peut être estimée en fonction de la qualité des liens vers d'autres nœuds géographiquement proches. Les auteurs dérivent une fonction de régression complexe qui renvoie la qualité du lien qui lie deux nœuds. Pour estimer la qualité d'un lien, l'algorithme prend un vecteur d'entrée qui contient l'ensemble des positions des nœuds voisins et la qualité correspondante de chaque lien ; basant sur ces informations, la fonction calcule la valeur estimée de la qualité du lien. Les expérimentations montrent que WRE offre une meilleure précision par rapport à WMEWMA. Cependant, WRE introduit des calculs complexes et implique une surcharge de calcul et un stockage élevé. Les auteurs supposent que la qualité du lien est corrélée à la distance (la supposition n'est pas toujours valide).

V.4.3. Etude comparative des métriques de la qualité du lien

De nombreuses recherches ont examiné les différentes métriques de qualité qui sont utilisées pour trouver les meilleurs chemins dans les réseaux ad hoc mobiles. Dans la partie précédente, nous avons défini et discuté les différentes métriques de qualité existant dans la littérature et nous avons présenté certaines contributions qui proposent de nouvelles métriques en appliquant certaines techniques ou en combinant quelques métriques existantes. Ces propositions sont intégrées dans des protocoles de routage basés sur la qualité du signal afin de trouver les meilleurs chemins afin d'assurer une meilleure fiabilité.

Nous présentons dans Table 4 une étude comparative de différentes métriques de qualité mentionnées précédemment ([101],[115]).

Type	Estimateur	Technique	Propriété du lien					Position	
			Qualité	PDR	Stabilité	Asymétrique	Autre		
Physique	RSSI	Lecture directe	x					Récepteur	
	SNR		x					Récepteur	
	LQI		x					Récepteur	
	LQP [109]	Grey theory	x			x		Récepteur	
Logique	Basé PRR	PRR		x				Récepteur	
		WMEWMA [113]			x			Récepteur	
	Basé RNP	RNP	Moyenne		x				Émetteur
		ETX	Moyenne		x		x		Émetteur
		ETT	Moyenne		x		x	bande passante	Émetteur
		4bit	Filtre		x		x		Émetteur /Récepteur
		F-ETX[116]	Filtre		x	x			Récepteur
	Score	F-LQE [99]	Logique flou	x	x	x	x		Récepteur
WRE [119]		Régression	x				Localisation	Récepteur	

Table 4. Tableau comparative des LQEs

Les LQEs à métrique unique sont insuffisants pour une estimation fiable de la qualité, car ils ne peuvent évaluer qu'une propriété du lien particulière et ainsi fournir une caractérisation partielle du lien. Les LQEs composées fournissent une estimation plus globale de la qualité des liens en combinant plusieurs métriques de liens.

À cet effet, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la conception de LQE composée qui combine plusieurs métriques englobant différents aspects de liens. Plusieurs nouveaux estimateurs et protocoles de routage basés sur la qualité ont été proposés dans ce contexte. Néanmoins, cette approche reste un axe de recherche ouvert. La conception d'un estimateur de qualité efficace et fiable doit être étudiée en fonction de temps de calcul requis, de complexité, de mémoire ; ainsi il doit répondre au maximum d'exigences vues précédemment telles que la stabilité, la robustesse, etc. Un autre défi se pose qui est de savoir comment combiner ces métriques, sachant qu'elles sont de nature différente (hétérogènes) [99].

V.5. Protocoles de routage multi objectifs avec prise en compte de la qualité

Nous avons vu dans les parties précédentes l'importance de la métrique de la qualité qui doit être prise en compte par les protocoles de routage en matière des LQEs afin d'assurer une transmission fiable et plus stable en conservant les ressources du réseau. Cependant, la métrique de la qualité seule est insuffisante visant d'autres paramètres tels que l'énergie et la mobilité. Les recherches les plus récentes proposent des protocoles de routage multi objectifs afin d'améliorer la performance du réseau. Nous présentons dans cette section un état de l'art de quelques travaux récents qui se basent sur plusieurs contraintes incluant la contrainte de la qualité du lien.

LD-OLSR (Link Defined OLSR) [120] est un protocole de routage basé sur le protocole OLSR qui utilise la contrainte d'énergie et de la qualité du lien. Le protocole OLSR n'utilise aucune métrique pour détecter la qualité de la liaison. Le protocole LD-OLSR modifie le processus de sélection des MPRs en ajoutant certains critères énergétiques. Chaque nœud calcule la durée de vie en fonction de la consommation d'énergie actuelle et du drain rate. Les nœuds qui peuvent devenir des MPRs sont seulement les nœuds qui satisfont deux conditions : une durée de vie acceptable et une énergie résiduelle restante acceptable. Une liaison sans fil est dite de bonne qualité si le paquet est transmis et acquitté avec succès. En effet, le protocole LD-OLSR utilise la métrique ETX pour estimer la qualité des liens qui sera utilisée pour la décision de routage. Les informations sur la qualité des liens sont stockées dans le cache au niveau de chaque nœud. Ensuite, l'algorithme de Dijkstra est exécuté sur le cache pour trouver le meilleur chemin vers le nœud de destination dont la valeur de la qualité d'un chemin est calculée en additionnant l'ETX de chaque lien composant ce chemin. Le protocole LD-OLSR a été comparé avec OLSR et EEOLSR ; il donne de meilleurs résultats en fonction de plusieurs paramètres de performance. Mais les simulations sont effectuées seulement avec un nombre nœuds réduits (20 nœuds). D'ailleurs, tous les paramètres de performance sont dégradés sans aucune justification avec l'augmentation de la durée de la simulation.

SEQCDR (Stable Energy efficient QoS based Congestion and Delay aware Routing) [121] est un protocole de routage réactif qui utilise des métriques multiples dans le processus de découverte de chemins. Il essaie de fournir un équilibrage de charge efficace au niveau du nœud et trouve un chemin stable entre le nœud source et le nœud de destination en répondant aux exigences de délai. Le protocole SEQCDR est basé sur quatre métriques : la puissance du signal RSSI, la taille de la file d'attente (le nombre total de paquets présents dans la file d'attente), le drain rate et le délai. Il définit pour chaque métrique un seuil et une contrainte de délai qui doit être respectée. Quand le nœud source veut transmettre des données vers un nœud de destination qui n'a pas un chemin valide, il lance le processus de découverte par la diffusion de message de requête *RREQ* dans le réseau jusqu'à atteindre le nœud de destination. Au niveau de chaque nœud intermédiaire et même la destination, le message de requête doit satisfaire les quatre métriques par rapport au seuil défini pour que le message soit rediffusé. Si l'un des critères n'est pas satisfait, alors le message *RREQ* sera supprimé. Donc, chaque nœud doit assurer la stabilité et éviter la congestion, puisque chaque nœud est responsable de détourner la congestion sur d'autres chemins alternatifs. Le protocole SEQCDR réduit le taux de perte des paquets et évite les liens congestionnés par rapport au protocole AODV. Cependant, l'élimination des nœuds peut devenir une mauvaise décision dans les réseaux à faible densité. Nous avons aussi discuté l'instabilité de la métrique RSSI qui est choisie comme une métrique de qualité.

Les auteurs dans [122] proposent un nouveau protocole de routage basé sur un critère de stabilité du lien, noté *LSF* (Link Stability cost Function). L'objectif de cette proposition est de choisir le chemin le plus stable afin d'améliorer la qualité de service et d'assurer une transmission fiable entre une source et une destination. *LSF* combine trois contraintes : la puissance de signal RSSI, le nombre de sauts et le nombre de conflits (contention count). Le nombre de conflits représente le nombre de nœuds qui se trouvent dans la zone de transmission du nœud (le nombre des nœuds voisins). Vu que le support de transmission sans fil est partagé, toute transmission concurrente réduit la bande passante disponible. Pour cela, la bande passante disponible d'un nœud est prise en considération d'une manière indirecte par la contrainte «contention count». La technique de normalisation «Upper Bound Normalization» est appliquée sur les trois contraintes utilisées. Chaque nœud calcule la valeur de *LSF* pour tous les nœuds voisins et sélectionne ensuite le nœud qui a la valeur maximale de *LSF* est sélectionné comme membre du groupe de transmission, car un nœud ayant un *LSF* maximum est capable de créer un lien plus stable et peut-être ajouté au chemin. Un modèle de probabilité est utilisé pour la sélection de meilleur chemin basant sur la valeur du *LSF* des liens. Le protocole proposé améliore les performances du réseau par rapport aux protocoles comparés. Cependant, le protocole proposé restreint la transmission et la retransmission des messages de découverte pour chaque nœud seulement à un seul nœud qui a la meilleure valeur de stabilité ; cette approche n'est pas fiable parce qu'on peut avoir une situation dans laquelle le chemin passant par ce nœud n'atteindra jamais le nœud de destination. De plus, la métrique de qualité RSSI utilisée dans ce protocole est instable dont une valeur maximale ne signifie pas toujours une bonne qualité (la présence d'interférences augmente la valeur du RSSI).

V.6. Conclusion

L'efficacité d'un protocole de routage dépend non seulement de la métrique d'estimation de qualité du signal, mais également de la manière d'intégrer cette métrique dans le protocole de routage pour la sélection du meilleur chemin. Nous avons abordé dans ce chapitre les principaux concepts liés à la qualité des liens dans un réseau ad hoc mobile. Dans un milieu urbain, les signaux radio sont affectés d'une manière fréquente les différents phénomènes à cause de la nature du milieu (présence d'obstacles, restriction de la mobilité, le taux de bruit inéligible...).

L'estimation de la qualité des liens a attiré beaucoup d'attention parce qu'elle apparaît comme un élément fondamental pour les réseaux sans fil. Un estimateur de la qualité du lien (LQE) doit répondre à certaines exigences: assurer un bon taux de livraison, être précis et stable, réactif (s'adapter aux changements du réseau), avoir une faible surcharge, etc. Le processus d'estimation de la qualité peut être assuré par une surveillance active, passive ou hybride. La surveillance active produit un flux supplémentaire pour estimer rapidement et efficacement la qualité. Cependant, la surveillance passive exploite le flux existant pour faire l'estimation.

Les estimateurs de qualité (LQE) sont classifiés en deux classes principales: métrique physique et métrique logique. Les métriques physiques (RSSI/LQI/SNR) sont simples (aucun calcul n'est requis) et faciles à lire à partir de la couche physique. Les métriques de qualité logiques peuvent être mesurées par les couches supérieures en se basant sur les rapports réceptions/retransmissions de paquets approximatifs. Il existe trois sous-catégories de métriques logiques : PRR, RNP et score.

L'estimation de la qualité du lien basant sur une seule métrique (par exemple, RSSI, PRR, RNP) a certaines limites ; une seule métrique ne peut évaluer qu'une propriété du lien particulière et ne fournit donc qu'une caractérisation partielle du lien. En effet, la problématique réside en la conception d'un estimateur du lien capable de prendre en compte les propriétés de lien afin d'assurer une estimation holistique. Dans ce contexte, beaucoup d'efforts ont abouti à des propositions LQE par la combinaison de plusieurs métriques physiques ou logiques. Un protocole de routage robuste dans un réseau ad hoc doit prendre en considération la métrique de qualité, car les chemins de routage ne doivent jamais être construits sur des liens de mauvaise qualité.

Nous avons finalisé ce chapitre par une étude comparative qui regroupe toutes les métriques de qualité standard avec d'autres propositions récentes. Le chapitre suivant présente un nouveau protocole de routage basé sur la qualité et la stabilité des liens dans un milieu urbain.

CHAPITRE VI

Protocole de routage multi chemins RMSQ-ua

Un réseau ad hoc est un ensemble de nœuds mobiles qui sont connectés à travers des liaisons sans fil. L'échange des messages à travers des interfaces sans fil est effectué par la transmission d'un message avec une puissance déterminée en format des signaux radio qui seront reçus par une destination. Le signal peut être affecté à cause de plusieurs phénomènes tels que : les interférences (vu que le canal de transmission est partagé dans les réseaux sans fil), le bruit (les signaux externes liés à l'environnement), la présence d'obstacles.... Donc, la propagation des signaux radio est sensible aux différents phénomènes qui affectent la qualité du signal, surtout dans un milieu urbain. Un milieu urbain tel que la ville se compose d'un ensemble de blocs (bâtiments, lotissement ...etc.) séparés par des rues qui engendrent la majorité du mouvement. Il est caractérisé alors par la restriction de la mobilité qui n'affecte pas seulement le mouvement, mais aussi la qualité du signal. De plus, le milieu urbain contient différentes sources de bruit (les signaux externes) en matière de signaux radio et de champs électromagnétiques qui se produisent par les différents matériels utilisés. De ce fait, des estimateurs de qualité du signal (appelé LQE) ont été proposés pour évaluer la qualité des liens qui doit être impliquée dans les protocoles de routage. Les métriques de qualité sont classifiées en métriques logiques et physiques. Cependant, la majorité des métriques uniques (que ce soit physique ou logique) sont instables ou peu fiables.

Nous proposons dans ce qui suit un nouveau protocole de routage pour les réseaux ad hoc mobiles dans les milieux urbains. Notre objectif est de sélectionner le chemin le plus stable qui fournit une meilleure qualité du signal pour garantir une transmission de données fiable. Notre protocole est basé sur deux contraintes : la stabilité et la qualité du lien. Nous avons estimé la stabilité des liens en fonction de la mobilité des nœuds par l'application de la technique EMA (Exponentiel Moving Average). Pour mesurer la qualité de lien, nous avons proposé une nouvelle métrique qui combine deux estimateurs, le SNR et le PRR avec un poids dynamique. Les informations liées à la mobilité et la qualité du lien sont collectées durant le processus de découverte ; elles seront utilisées par le nœud source pour évaluer les chemins trouvés et sélectionner le meilleur. Notre proposition permet de sélectionner les chemins les plus stables avec une meilleure qualité des liens, ceci améliore la fiabilité de la transmission, réduit le nombre de coupures des liens et conserve plus d'énergie.

VI.1. Le protocole RMSQ-ua

Notre protocole RMSQ-ua [20] (Reliable Multipath Routing Protocol based on Link Quality and Stability in Urban Areas) est un protocole de routage réactif et multi chemins, qui prend en compte deux contraintes: la stabilité et la qualité du lien, dédié pour un milieu urbain. Ces contraintes sont combinées par une fonction objective pour classer les chemins trouvés durant la découverte, afin de sélectionner le chemin le plus stable qui fournit une meilleure qualité.

Pour améliorer la précision de l'estimateur de la qualité, nous avons proposé une nouvelle métrique qui combine deux LQEs : le SNR (Signal Noise Ratio) qui estime la qualité du signal en fonction de la puissance du signal reçu par rapport au niveau du bruit observé et PRR qui permet de donner une estimation de taux de livraison des paquets de données durant une période déterminée.

Le SNR est un estimateur physique qui est combiné avec une version améliorée de la métrique PRR (Packet Reception Ratio) en tenant compte du taux de pertes de paquets successifs. Le SNR précise, rapide, mais instable (un petit changement affecte considérablement la qualité). La métrique PRR est une métrique logique lente qui nécessite des transmissions de données préalables, mais elle offre plus d'efficacité. Nous avons combiné un estimateur de qualité basé sur le SNR et le PRR afin d'exploiter les avantages des métriques physiques et logiques. Cela nous permet de choisir efficacement le chemin avec une bonne qualité et éviter les chemins qui ont une dégradation de la qualité. Un autre critère est pris en considération qui est la stabilité du lien basée sur la mobilité des nœuds pour éviter les ruptures des liens dans un milieu urbain. Au lieu de générer de nouveaux messages de contrôles, nous avons exploité les messages de contrôle du protocole de routage en les adaptant pour collecter les informations concernant les liens qui seront utilisées pour évaluer ces liens et les chemins par la suite.

Des études ([84], [123]) ont prouvé que le choix du modèle de mobilité a également un impact considérable sur les performances des protocoles de routage. De ce fait, nous avons évalué notre protocole de routage dans différents modèles de mobilité urbains: Le modèle Manhattan Grid qui modélise le mouvement dans une ville (une modification est portée sur ce modèle en ajoutant l'effet de dégradation du signal causée par les restrictions géographiques) et le modèle SMOOTH[87] qui est un modèle de mobilité dédié au mouvement humain.

La sélection d'un chemin stable et de bonne qualité nous aide à améliorer les performances du réseau ad hoc et à maximiser la durée de vie du chemin sélectionné en diminuant le nombre de ruptures des liens causant les pertes de paquets. Les résultats de la simulation montrent que notre protocole RMQS-ua améliore les performances du réseau ad hoc et offre plus de fiabilité par rapport à certains protocoles récents tels que DTRP [124] et ELE-AOMDV [125].

VI.1.1. Justification du choix des métriques de la qualité

Nous avons décrit brièvement dans le chapitre précédent les différentes métriques de qualité qui sont classifiées en deux catégories fondamentales : physique et logique. Chaque catégorie, ou plutôt chaque métrique a des avantages et des limites. Les métriques physiques fournissent généralement une évaluation rapide de la qualité, car elles sont mesurées directement à partir de l'interface physique sans besoin d'aucun calcul. Donc, elles nous donnent une estimation immédiate dès la réception d'un seul paquet. Cependant, elles sont moins précises et même instables en particulier dans la région intermédiaire (transitionnelle) vue que l'estimation de la qualité dans telle région peut changer soudainement d'une bonne valeur vers une mauvaise valeur. D'ailleurs, la qualité est mesurée seulement pour les paquets bien reçus ce qui peut sous-estimer la qualité du lien.

Les métriques logiques donnent une meilleure précision par rapport aux métriques physiques, mais elles nécessitent un ensemble de paquets déjà reçu pour bien estimer la qualité. Elles sont généralement mesurées dans une fenêtre (un nombre de paquets spécifié ou une durée de temps). Ces métriques requièrent des calculs en appliquant des fonctions (telles que la moyenne, un filtre...etc.) sur l'ensemble des informations enregistrées. Donc, nous pouvons dire que les métriques logiques ont une convergence lente et nécessitent un temps pour calculer efficacement la qualité des liens. Par conséquent, ce type de métrique n'est pas adapté pour produire la première décision de routage, car il nécessite l'envoi de trafic au préalable (soit des messages de contrôles, soit des paquets de données).

Enfin, afin d'avoir un estimateur de qualité fiable, nous devons combiner à la fois une ou plusieurs métriques physiques (nous avons choisi le SNR) avec des métriques logiques (nous avons choisi une version améliorée de la métrique PRR). Plusieurs recherches ([101], [105], [98]) ont prouvées que la métrique SNR offre de meilleures performances, moins sensible par rapport au RSSI parce qu'elle prend en considération en plus la puissance du signal, le niveau de bruit. Le choix du PRR est qu'il ne génère pas un surcoût de messages de contrôle comme les métriques basées sur RNP, mais il est considéré comme un estimateur instable (ne détecte pas la dégradation soudaine). Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une version améliorée de PRR en appliquant une fonction exponentielle qui prend en compte le nombre des paquets successifs perdus comme un poids dynamique.

VI.1.2. Définition du problème

Un réseau ad hoc est un ensemble de nœuds mobiles connectés entre eux à l'aide de liaisons sans fil. Nous pouvons représenter un réseau comme un graphe non orienté $G=(N,L)$, où $N=\{n_0, n_1, \dots\}$ est l'ensemble des nœuds d'un réseau et $L=\{l_{0,1}, l_{1,i}, \dots\}$ est l'ensemble des liens de ce réseau (où $l_{i,j}$ représente le lien qui lie le nœud n_i avec le nœud n_j).

On note $P_k(n_0, n_m) = n_0, n_{k1}, \dots, n_m$ le chemin k de l'ensemble des chemins $P(n_0, n_m)$ entre un nœud source n_0 et un nœud de destination n_m .

Nous avons utilisé la distance euclidienne $d_{i,j}(t)$ entre deux nœuds voisins n_i qui a les coordonnées (x_i, y_i) , et n_j qui a les coordonnées (x_j, y_j) à un temps t , donné par :

$$d_{i,j}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \quad (30)$$

La propagation du signal radio peut être affectée par plusieurs facteurs (tels que le bruit) qui dégradent la qualité du signal. Le paquet est transmis principalement avec une puissance déterminée qui se diminue avec l'augmentation de la distance. On note n_i comme un nœud transmetteur et n_j comme un nœud récepteur. Pour chaque lien $l_{i,j} \in L$, et conformément au modèle de propagation le plus utilisé [126], la métrique SNR (Signal Noise Ratio) à un moment donné t peut être mesurée pour chaque paquet reçu comme suit :

$$SNR_{i,j}(t) = P_{tr} - PL(d_0) - 10 * n * \log\left(\frac{d_{i,j}(t)}{d_0}\right) - X_\sigma - P_n \quad (31)$$

où P_{tr} représente la puissance de transmission du paquet reçu, $PL(d_0)$ représente l'affaiblissement du signal sur un trajet à la distance de référence d_0 (généralement égale à 1

m), X_σ est une variable aléatoire gaussienne avec une moyenne = 0 (représentant l'effet du shadowing).

Basant [109] et [126], la formule de la métrique $RSSI_{i,j}(t)$ pour le lien $l_{i,j}$ à un moment donné t est donnée par:

$$RSSI_{i,j}(t) = P_{tr} - PL(d_0) - 10 * n * \log\left(\frac{d_{i,j}(t)}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (32)$$

Si on pose P_n la valeur du bruit du lien $l_{i,j}$ à l'instant t (en dbm) ; à partir de l'équation (31) et (32), nous pouvons avoir un SNR formuler comme suit :

$$SNR_{i,j}(t) = RSSI_{i,j}(t) - Noise_{i,j}(t) \quad (33)$$

La métrique PRR (Packet Reception Ratio) à l'instant t est donnée par :

$$PRR_{i,j}(t) = \frac{NR_{i,j}(t)}{NS_{i,j}(t)} \quad (34)$$

Où $NR_{i,j}(t)$ définit le nombre de paquets bien reçus par le nœud n_j à partir du nœud n_i à un moment t , et $NS_{i,j}(t)$ définit le nombre de paquets envoyés par le nœud n_i vers le nœud n_j à l'instant t .

VI.1.3. La conception du protocole RMQS-ua

Notre protocole repose sur trois processus de base :

- La découverte de chemins : ce qui nous permet de trouver des chemins multiples entre le nœud source et de destination. Durant ce processus, nous allons collecter les informations nécessaires liées aux contraintes utilisées (la qualité et la stabilité),
- La sélection des chemins : c'est la procédure qui évalue les chemins trouvés durant la découverte et sélectionne le meilleur chemin en matière de qualité et de stabilité afin d'assurer une fiable communication,
- La maintenance : lors d'une rupture d'une communication active, cette procédure est déclenchée afin de rétablir la communication dans un temps court.

VI.1.3.1. Processus de découverte du protocole RMQS-ua

L'objectif de ce processus est de trouver plusieurs chemins entre un nœud source et un nœud de destination à la demande. Le protocole RMQS-ua utilise les mêmes messages de contrôle du protocole AOMDV: *RREQ* (un message de requête) et *RREP* (un message de réponse) qui sont utilisés dans le processus de découverte; un message de type *Hello* est utilisé pour détecter les nœuds voisins et vérifier la connectivité de chaque nœud avec ses voisins ; enfin un message d'erreur *RERR* utilisé dans le processus de maintenance pour annoncer la perte d'un lien.

Nous avons effectué des modifications sur la structure des messages de contrôle de base afin de les adaptés à notre approche qui se base sur les contraintes de qualité du lien et la stabilité. Les champs ajoutés sont :

- Pour le message *Hello*, $C_j(t)$ représente les coordonnées du nœud n_j qui est un voisin du nœud intermédiaire n_i à l'instant t .

- Pour les paquets *RREQ* et *RREP*, $fs_{i,j}(t)$ représente la valeur maximale de la stabilité des liens $l_{i,j}$ composant un chemin et $fq_{i,j}(t)$ représente la valeur minimale de la qualité.

Pour tous les messages, les champs source et destination désignent respectivement le nœud source et le nœud de destination et le champ numéro de séquence est utilisé pour assurer la fraîcheur des chemins. La Figure 32 et la Figure 33 présentent respectivement la structure du message *Hello* et le message *RREQ* de notre protocole.

@ Destination	Numéro de Sequence de la Destination	$C_j(t)$	Temps expiration
---------------	--------------------------------------	----------	------------------

Figure 32. La structure du message Hello du RMSQ-ua

REQ_ID	Numéro de Sequence de la Destination	@ Destination	Numéro de Sequence de la Source	@ Source	$fs_{i,j}(t)$	$fq_{i,j}(t)$
--------	--------------------------------------	---------------	---------------------------------	----------	---------------	---------------

Figure 33. La structure du message RREQ du RMSQ-ua

En outre, des modifications ont été effectuées sur la table de routage (les valeurs de la fonction de stabilité $fs(t)$ et de la fonction de qualité $fq(t)$ sont ajoutées) comme le montre la Figure 34 :

Destination
Numéro de séquence de Destination
Advertised_hopcount
Route_list { (Nexthop1, Hop-count1, $fs(t)$, $fq(t)$); (Nexthop2, Hop-count2, $fs(t)$, $fq(t)$); }
Expiration timeout

Figure 34. La structure de la table de routage du RMSQ-ua pour un nœud i

Lorsqu'un nœud source a l'intention d'envoyer des paquets de données à un nœud de destination spécifique, il consulte premièrement sa table de routage. S'il a un chemin valide vers ce nœud de destination, il établit immédiatement la communication et commence la transmission de données. Sinon, si aucun chemin n'est disponible vers ce nœud de destination, le nœud source lance un processus de découverte de chemin en diffusant un message *RREQ* vers tous les voisins directs (qui se trouvent à un seul saut). Il définit également un timer *RREQ_Timer* pour gérer le cas où le nœud de destination est inaccessible.

Initialement, lorsqu'un nœud intermédiaire reçoit un message *RREQ*, il vérifie si le message *RREQ* reçu est unique en examinant l'identifiant du *RREQ* (*REQ_ID*). Un seul *RREQ* sera transmis par le nœud intermédiaire (le premier *RREQ* reçu seulement) ; tous les messages dupliqués qui portent le même identifiant seront ignorés. Par la suite, le nœud intermédiaire compare les valeurs fs et fq (représentent respectivement la stabilité et la qualité) du *RREQ* avec celui qui est enregistré dans la table de routage du lien reliant ce nœud avec le nœud précédent (qui a transmis le *RREQ*) ; il met à jour les champs fq par la valeur minimale (la plus mauvaise qualité) et fs par la valeur maximale (la mauvaise stabilité). Puis, il maintient le chemin inverse vers le nœud source. Si le nœud intermédiaire a un chemin valide vers le

nœud de destination, il génère un message de réponse *RREP* et le renvoie par le chemin inverse vers le nœud source. Sinon, il incrémente la valeur du hop-count et diffuse le *RREQ* à

Algorithme 5 RMSQ-ua : lorsque le nœud j recevoir un <i>RREQ</i> du nœud i pour un nœud de destination d	
Let s : source node, d : destination node, i : the forwarding node.	
if ($RREQ[SeqN] > SeqN^s$) then	// si est un nouveau message (fraîche)
Remove all reverse paths to s from routing table	
$SeqN^s := RREQ[SeqN]$	
advertised_hop s = infinite	
Create a reverse path to s through i with ($RREQ$ [hop-count] + 1)	
else if ($RREQ[SeqN] = SeqN^s$) then	
Insert a new reverse path to s through i with ($RREQ$ [hop-count] + 1)	
else Drop RREQ endif	
if ($(j = d)$ or (j have a valid route to d)) then	// les cas dont ce noeud génere une réponse
generate RREP having	
$RREP[fs] = \max(RREQ[fs], fs_{i,j}(t))$ and	$RREP[fq] = \min(RREQ[fq], fq_{i,j}(t))$
Send RREP to s through i	
else if (is not duplicated RREQ) then	// vérifie s'il est le premier RREQ
$RREQ$ [hop-count] ++	
$RREQ[fs] = \max(RREQ[fs], fs_{i,j}(t))$	
$RREQ[fq] = \min(RREQ[fq], fq_{i,j}(t))$	
Re-broadcast RREQ to all neighbors	
else drop RREQ endif	// si REQ_ID déjà vue précédement, supprime

ses voisins. L'algorithme 5 décrit le traitement du message *RREQ* jusqu'à atteindre le nœud de destination.

Le même processus sera répété pour chaque nœud intermédiaire jusqu'à ce que le message *RREQ* atteigne le nœud de destination, ou lorsque le *RREQ_Timer* expire sans recevoir de *RREP*. On note que le temps d'expiration est vérifié à chaque réception d'un message de contrôle, tout message qui dépasse ce temps sera supprimé sans aucun traitement. De plus, à chaque nœud, le numéro de séquence du nœud source ou destination (*SeqN*) doit être vérifié afin de garantir la fraîcheur des informations du chemin et d'éviter une boucle de chemin. Si un message reçu a un numéro de séquence plus grand que la valeur stockée dans la table de routage pour le même chemin, alors le nœud supprime tous les chemins existants vers le nœud transmetteur et crée une nouvelle entrée de chemin.

Une fois le nœud de destination génère un message *RREP*, il le transmet au nœud intermédiaire en unicast par le chemin inverse vers le nœud source. Chaque nœud intermédiaire retransmet le message *RREP* par le chemin inverse (enregistré durant le processus de découverte) jusqu'à atteindre le nœud source. Pour notre protocole, le nœud source peut recevoir plusieurs *RREPs* (plusieurs chemins ont été trouvés). À cet effet, lorsque le nœud source reçoit le premier message *RREP*, il définit un timer *RREP_Timer* et attend un temps spécifique pour collecter d'autres *RREP* s'ils existent. Dès l'expiration du *RREP_Timer*, le nœud source évalue les différents chemins disponibles en fonction des informations collectées (la valeur des métriques de la qualité et de la stabilité). Les chemins seront ensuite classés suivant la valeur de la fonction objective (plus de détails dans la partie

suivante) de chaque chemin en ordre décroissant, le premier chemin (représente le meilleur chemin) sera utilisé pour la transmission de données. L'algorithme 6 décrit le traitement du message *RREP* jusqu'à atteindre le nœud source.

```
Algorithme 6 RMSQ-ua: lorsque un nœud  $j$  reçoit un message RREP du nœud  $i$  pour un nœud de destination  $d$ 
if ( $RREP[SeqN] > SeqN^d$ ) then                                     //c'est un message récent et fraîche
    Remove all reverse paths to  $d$  from routing table
     $SeqN^d = RREP[SeqN]$ 
     $advertised\_hop^d = infinite$ 
    Create a reverse path to  $d$  through  $i$  with ( $RREP[hop-count] + 1$ )
else if ( $RREP[SeqN] = SeqN^d$ ) then
    Insert a new reverse path to  $d$  through  $i$  with ( $RREP[hop-count] + 1$ )
endif
if ( $j = s$ ) then                                             // si on a atteint la source
    if (is the first RREP) then set RREP_Time                   //attendre pour collecter plus de message RREPs
    if (RREP_Time is expired) then start sending data packet through the optimal path
else
     $RREP[hop-count] ++$ 
    Forward RREP to next hop
endif
```

Si le nœud source n'a reçu aucun message *RREP* après l'expiration du *RREQ_Timer* (ce qui signifie que le nœud de destination n'est pas atteint), il déclenche un nouveau processus de découverte et diffuse à nouveau un message *RREQ* avec une valeur de numéro de séquence de destination incrémentée ($SeqN++$) dans le réseau. Cette opération sera répétée pour un nombre défini, dans le cas où aucune réponse n'aurait été reçue. Si le nœud source a lancé le nombre maximum d'essais sans recevoir de message *RREP*, alors elle arrête le processus de découverte et considère le nœud de destination comme un nœud non atteignable.

VI.1.3.2. Processus de sélection et évaluation des chemins

Quand le timer *RREP_Timer* expire, le nœud source peut recevoir plusieurs messages *RREP* qui représentent des chemins multiples à lien disjoint. À ce moment, le nœud source doit évaluer ces chemins et choisir le meilleur chemin (en matière de qualité et de stabilité) pour transmettre les paquets de données.

VI.1.3.2.a. La fonction de la qualité du lien

Nous avons discuté dans ce chapitre le choix des métriques de qualité utilisées. La fonction de qualité, définie comme $f_{q_{i,j}}(t)$ est une combinaison de deux estimateurs de qualité de signal : le SNR (une métrique physique) et le PRR (une métrique logique)

Afin de fournir une bonne estimation du PRR, nous considérons la perte de paquets successive comme un facteur affectant la qualité du lien. Les liens peuvent être instables à cause de plusieurs facteurs environnementaux externes, la mobilité des nœuds, les interférences radio...etc.

La métrique PRR ne peut pas détecter le changement soudain de la qualité du lien (une dégradation ou une amélioration) dans un temps opportun. Elle peut différencier efficacement entre les liens stables et instables surtout dans le cas où la taille de la fenêtre est grande.

Pour éviter cette limite, nous avons utilisé les pertes de paquets successives pour estimer la qualité du lien. $PRR_{enh_{i,j}}(t)$ désigne le taux de réception des paquets reçus par le nœud n_j depuis le nœud n_i , formulé comme suit :

$$PRR_{enh_{i,j}}(t) = \left(1 - \frac{e^{\frac{n_loss_{i,j}(t)}{max_loss} - 1}}{e - 1}\right) * PRR_{i,j}(t) = \left(1 - \frac{e^{\frac{n_loss_{i,j}(t)}{max_loss} - 1}}{e - 1}\right) * \frac{NR_{i,j}(t)}{NS_{i,j}(t)} \quad (35)$$

Où $n_loss(t)$ est le nombre de paquets successif perdu et max_loss est le nombre maximum de paquets pouvant être perdus pour considérer le lien comme instable.

Nous avons choisi un poids exponentiel basé sur les pertes de paquets successives $e^{\frac{n_loss_{i,j}(t)}{max_loss}}$, ce qui augmente le poids de façon exponentielle si plusieurs paquets successifs ont été perdus. Afin de garantir que la valeur du poids est comprise entre 0 et 1, nous avons appliqué la normalisation max-min (appelée upper-lower bound normalization)[127], ce qui nous donne :

$$g_{ij}(t) = \frac{e^{\frac{n_loss_{i,j}(t)}{max_loss} - 1}}{e - 1} \quad ; \quad \text{où} \quad \begin{cases} \text{si } n_loss_{i,j}(t) = 0 & \text{alors } g_{min}(t) = 0 \\ \text{si } n_loss_{i,j}(t) = max_loss & \text{alors } g_{max}(t) = 1 \end{cases} \quad (36)$$

Afin d'avoir un poids décroissant lorsque le nombre de paquets perdus successivement augmente, nous avons pris la fonction du poids: $1 - g_{ij}(t)$

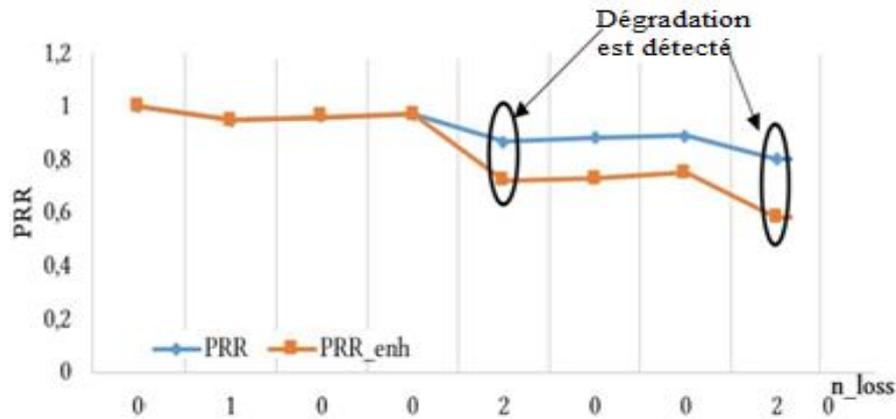


Figure 35. La différence entre PRR et PRR_enh

La figure 35, illustre un exemple clarifiant l'impact de notre contribution par rapport à la métrique de PRR standard. Tel qu'il est montré, la perte d'un paquet n'affecte pas la métrique choisie, cependant la perte de plusieurs paquets successifs indique que le lien se dégrade d'une façon abusive et doit être détecté. Les résultats montrent que la valeur de PRR_{enh} diminue significativement dans cette situation afin de détecter rapidement les changements de la qualité du lien.

Un coefficient dynamique α est désigné pour la fonction de qualité $f_{q_{i,j}}(t)$ suivant le nombre de paquets transmis par rapport à la taille de la fenêtre. Nous avons exploité la précision de la métrique PRR (surtout si le nombre de paquets transmis est acceptable) et la rapidité de la métrique SNR afin de fournir une évaluation fiable de la qualité. Pour l'état

initial, où le nombre de paquets envoyé est nul ou très faible, le coefficient favorise la métrique SNR ; sinon, il favorise le PRR (le PRR fournit des informations plus précises lorsque le nombre de paquets transmis est important).

Pour un lien donné $l_{i,j}$, la taille de la fenêtre de paquets est notée w . La fonction de qualité de lien $f_{q_{i,j}}(t)$ à l'instant t donnée par :

$$f_{q_{i,j}}(t) = \alpha * PRR_{enh_{i,j}}(t) + (1 - \alpha) * \frac{SNR_{i,j}(t)}{Max_{SNR_{i,j}}}, \text{ where } \alpha = q * (2^{\frac{nbr_p}{w}} - 1) \quad (37)$$

Avec q qui représente le seuil maximal du coefficient α , nbr_p est le nombre de paquets reçu durant une fenêtre w et Max_SNR est la valeur maximale observée du SNR pour le lien $l_{i,j}$.

VI.1.3.2.b. La fonction de la stabilité du lien

La mobilité des nœuds est l'une des causes principales conduisant aux ruptures des liens à cause de la limite de la zone de couverture. De ce fait et pour mesurer la stabilité du lien, nous avons pris en considération la mobilité des nœuds comme base pour évaluer la stabilité des liens.

Un nœud n_i diffuse périodiquement un message *Hello* à tous ses voisins contenant ses coordonnées. Une fois qu'un voisin n_j reçoit ce message, il calcule la distance euclidienne $d_{i,j}(t)$ entre eux puis met à jour le coût de stabilité $fs_{i,j}(t)$.

Soient deux nœuds voisins notés n_i et n_j . $EMA_{i,j}(t)$ représente la moyenne mobile exponentielle des distances successives entre n_i et n_j à l'instant t donnée par :

$$EMA_{i,j}(t) = \begin{cases} d_{i,j}(t) & \text{si } t = 0 \\ \sigma * d_{i,j}(t) + (1 - \sigma) * EMA_{i,j}(t - 1) & \text{sinon} \end{cases}, \text{ avec } \sigma \in [0, 1] \quad (38)$$

On pose: $\delta = d_{i,j}(t) - EMA_{i,j}(t - 1)$

$$Var_{i,j}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t = 0 \\ (1 - \sigma) * (Var_{i,j}(t - 1) + \sigma * \delta^2) & \text{sinon} \end{cases} \quad (39)$$

La technique basée sur EMA permet de calculer rapidement la moyenne sur la base des échantillons de données précédents en tenant compte seulement de la dernière valeur d'EMA. Donc, cette technique préserve le stockage dans les nœuds, car elle ne nécessite que le dernier échantillon observé pour être enregistré.

La fonction $fs_{i,j}(t)$ (basée sur l'écart type) permet de calculer la stabilité du lien $l_{i,j}$ qui relie les deux nœuds n_i et n_j à l'instant t est formulée comme suit :

$$fs_{i,j}(t) = \frac{\sqrt{Var_{i,j}(t)}}{R - EMA_{i,j}(t)} \quad (40)$$

Où R représente la portée de transmission des nœuds et $Var_{i,j}(t)$ représente la variance.

La fonction de la stabilité mesure la dispersion d'une série discrète d'une variable (la distance dans notre cas), le cas d'une bonne dispersion, cette fonction tend vers 0 (i.e. une bonne stabilité des liens).

VI.1.3.2.c. La fonction objective

Afin de sélectionner le meilleur chemin, nous proposons une fonction objective qui est le résultat d'une combinaison de deux fonctions: la fonction de la stabilité $fs_{i,j}(t)$ et la fonction

de la qualité des liens $f_{q_{i,j}}(t)$. Pour un chemin $P_{k(n_0, n_m)}$ entre un noeud source n_0 et un noeud de destination n_m , la fonction objective est donnée par:

$$f_{k(n_0, n_m)} = 100 * \beta * f_{qp_{k(n_0, n_m)}} + \frac{(1-\beta)}{f_{sp_{k(n_0, n_m)}}} \quad \text{with } \beta \in [0, 1] \quad (41)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} f_{qp_{k(n_0, n_m)}} = \min_{n_0}^{n_m} \{ f_{q_{i,j}}(t) \} \\ f_{sp_{k(n_0, n_m)}} = \max_{n_0}^{n_m} \{ f_{s_{i,j}}(t) \} \end{cases} \text{ où } l_{i,j} \in p_k.$$

Le coefficient β dépend de la qualité du chemin. Il définit la moyenne des changements de la qualité observés sur tous les liens composant ce chemin, et m est le nombre de liens d'un chemin P_k , donné par :

$$\beta = \sum_{n_0}^{n_m} \frac{\Delta PRR_{i,j}(t)}{m}$$

Finalement, nous avons calculé la valeur du coefficient β par la formule suivante:

$$\beta = \frac{1}{2} + \sum_0^m \frac{\Delta PRR_{i,j}(t)}{2 * m} \quad (42)$$

Les valeurs des deux fonctions $f_{qp_{k(n_0, n_m)}}$ et $f_{sp_{k(n_0, n_m)}}$ sont calculées et collectées durant le processus de découverte en exploitant les messages *RREP*. A l'expiration du *RREP_Timer*, le noeud source calcule pour chaque chemin la valeur de la fonction objective. Le chemin qui a la valeur maximale sera sélectionné pour l'envoi des paquets de données.

Nous avons défini un seuil *Thr* afin de ne pas sélectionner les chemins instables est de mauvaise qualité et ceci même s'il y a un seul chemin découvert. Ce seuil permet de préserver une connectivité minimale de notre réseau.

VI.1.3.3. Processus de maintenance des chemins

Le protocole de routage doit assurer la maintenance des chemins actifs, afin de bien gérer les ruptures possibles dans le réseau. La connectivité est assurée par l'échange des paquets *Hello*, qui sont échangés périodiquement (chaque T_{hello}). Dans notre protocole, un lien est considéré comme perdu si le noeud ne reçoit pas successivement un nombre déterminé de messages *Hello* (H messages) d'un voisin. Si un noeud intermédiaire détecte une coupure d'un lien (vers un noeud voisin n_i qui représente le noeud suivant d'un chemin actif), il supprime immédiatement ce lien de sa table de routage et génère un message *RERR* (Route Error) contenant la liste des noeuds inaccessibles, puis renvoie le message par le chemin inverse vers le noeud de source. Chaque noeud intermédiaire qui reçoit le message d'erreur supprime le chemin vers n_i et tous les autres chemins qu'utilisent n_i comme prochain saut, il ajoute dans le message les adresses des noeuds inaccessibles par ce noeud (à cause de la coupure) à la liste des noeuds inaccessible, puis retransmet le message *RERR* vers le noeud source. Une fois que le noeud source reçoit le message *RERR*, il supprime les chemins contenant les noeuds inaccessibles. Le noeud source vérifie s'il a un chemin alternatif vers le noeud de destination; si aucun chemin n'est disponible, il relance un nouveau processus de découverte.

VI.1.4. Exemple de fonctionnement du protocole RMQS-ua

Nous présentons dans la Figure 36, un exemple de fonctionnement de notre protocole RMS-ua décrivant principalement le processus de découverte (le nœud *S* représente le nœud source et *D* représente le nœud de destination). Le nœud source diffuse un message *RREQ* dans tout le réseau. Les messages *RREQ* seront retransmis par les nœuds du réseau saut par saut jusqu'à atteindre le nœud de destination (suivant l'algorithme 5).

Le nœud de destination répond à chaque *RREQ* par un message *RREP* (chaque message *RREQ* reçu représente un chemin à lien disjoint) qui passe à travers le chemin inverse jusqu'à le nœud source. Une fois le nœud source reçoit le premier *RREP*, attend un certain temps (*Wait_Time_RREP*) pour recevoir d'autres messages.

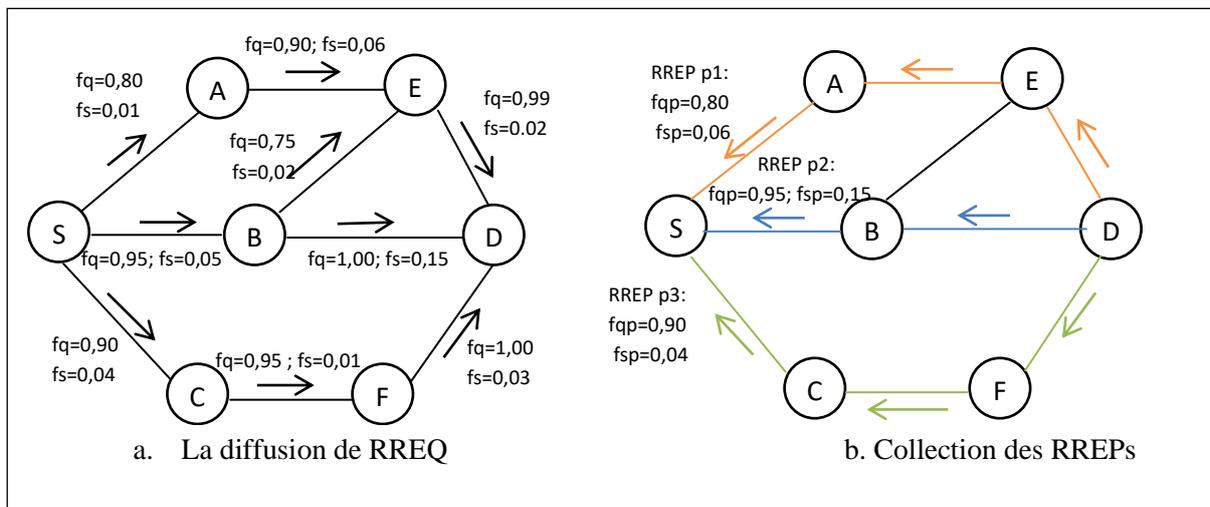


Figure 36. Exemple de processus de découverte du protocole RMQS-ua

Le temps d'attente *Wait_Time_RREP* étant expiré, le nœud source calcule la valeur de la fonction objective de chaque chemin trouvé (trois chemins sont trouvés dans l'exemple). Les valeurs de la fonction objective des trois chemins trouvés suivant notre exemple sont: 54,66, 59,66 et 64,00 (voir la table Table 5. Table de routage de l'exemple pour le protocole RMQS-ua qui représente la table de routage du nœud source). Le nœud source sélectionne le troisième chemin pour transmettre les paquets de données, car il a la valeur la plus élevée. Enfin, si une coupure au niveau du chemin actif est détectée (ou le manque de sa qualité par rapport au seuil), le nœud source sélectionne le chemin suivant pour la transmission des données (deuxième chemin dans notre exemple).

Destination	Numéro de séquence destination	Advertised Hop count	Next hop	Hop count	Fs	Fq
D	102	3	A	3	0,06	0,80
			B	2	0,15	0,95
			C	3	0,04	0,90

Table 5. Table de routage de l'exemple pour le protocole RMQS-ua

VI.1.5. Evaluation des performances du protocole RMQS-ua

Dans cette section, nous présentons l'évaluation de notre protocole de routage à l'aide de la simulation, pour valider ses performances. Tout d'abord, nous décrivons nos paramètres de performances ainsi que l'environnement de simulation. Ensuite nous comparons notre solution avec quatre protocoles de routage récents qui sont : AOMDVxDDR [128], DTRP [124], A-LSEA [129] et ELE-AOMDV [125], cette comparaison est basée sur trois modèles de mobilité RWP (Random Waypoint), Manhattan Grid et SMOOTH. Cette évaluation est accompagnée d'une analyse et d'une discussion des résultats.

VI.1.5.1. Les paramètres de performances :

Nous avons évalué notre protocole en utilisant quatre paramètres de performance :

- PDR (Packet Delivery Rate): c'est le rapport entre le nombre de paquets de données reçus par la destination et le nombre de paquets de données envoyés par la source.
- Overhead (flux de contrôle): c'est le rapport entre le nombre total de paquets de contrôle envoyés par tous les nœuds composant le réseau et le nombre de paquets de données reçus.
- La Consommation d'énergie normalisée : c'est la somme de l'énergie consommée par tous les nœuds durant toute la durée de simulation sur le nombre de paquets de données reçus.
- Le débit (throughput) : mesuré en kilobits par seconde (Kbps). C'est le nombre total de bits de données reçus par la destination sur l'unité de temps.

VI.1.5.2. Environnement de simulation

Les simulations présentées ont été réalisées avec le simulateur NS2.35 [95] (Network Simulator 2.35). Nous avons utilisé l'outil Bonnmotion [130] qui est un outil basé sur Java afin de générer différents scénarios pour les trois modèles de mobilité (RWP, Manhattan Grid et SMOOTH).

Afin de simuler au mieux l'environnement urbain avec ses sources de bruit, nous avons implémenté un module de bruit dans le simulateur, où chaque lien reliant deux nœuds a une valeur de bruit aléatoire. La valeur de bruit peut changer avec le temps avec une probabilité de P_c . Ce changement aléatoire est lié aux phénomènes inattendus (champs électromagnétiques, présence d'autres réseaux...etc.). La valeur SNR calculée peut conduire à une perte de paquets; nous définissons deux seuils, SNR_{min} et SNR_{max} comme suit :

- Si le SNR est inférieur à SNR_{min} , le paquet est définitivement perdu,
- Si le SNR est supérieur à SNR_{max} , le paquet est reçu sans erreur,
- Si le SNR est entre SNR_{min} et SNR_{max} , le paquet peut être perdu à cause d'une erreur avec une probabilité calculée en fonction du SNR actuel [20].

Ils existent différents modèles de mobilité pour les réseaux MANETs qui peuvent affecter leurs performances. Le modèle de mobilité fréquemment utilisé est le modèle aléatoire Random Waypoint (RWP) à cause de sa simplicité. Par contre, les réseaux MANET peuvent être utilisés dans différentes applications où les modèles de mobilité sont complexes et réalistes ce qui n'est pas le cas du modèle RWP. Pour cette raison, nous avons utilisé deux autres modèles de mobilité (en plus RWP): Manhattan Grid (qui décrit la mobilité dans un

environnement urbain), SMOOTH (décrivant le comportement humain en matière de mobilité).

- Random Waypoint[82] : chaque nœud mobile choisit aléatoirement une destination. Il peut se diriger vers cette destination avec une vitesse constante choisie uniformément et aléatoirement, la vitesse et la direction d'un nœud sont choisies indépendamment des autres nœuds. En arrivant à la destination, le nœud s'arrête pour une durée définie par le temps de pause t_{pause} . Après cette pause, il choisit de nouveau une autre destination aléatoire et se dirige vers elle.
- Manhattan Grid [82]: le mouvement des nœuds est restreint aux chemins spécifiques (le mouvement dans une zone urbaine contenant des rues) qui sont déterminés par deux paramètres : le nombre de blocs horizontaux u et le nombre de blocs verticaux v . les nœuds peuvent tourner à chaque intersection soient à gauche ou à droite une probabilité P_{turn} . Pour ce modèle, l'impact des blocs sur le signal (shadowing) n'est pas pris en considération dans le simulateur, nous avons apporté quelques modifications afin que ce soit faisable.
- SMOOTH [87]: c'est un modèle de mobilité récent, basé sur plusieurs caractéristiques du mouvement humain. Le concept est de créer un nombre spécifique de sites nommés « clusters » (qui représentent des communautés) et d'obtenir une popularité aléatoire pour chacun. Le nœud mobile est initialement attribué au hasard aux clusters. Chaque nœud visite quelques emplacements plus fréquemment que d'autres et peut explorer un nouvel emplacement avec une probabilité spécifique.

VI.1.5.3. Evaluation des performances

Les protocoles de routage de comparaison choisis portent les mêmes caractéristiques de notre protocole à savoir: réactifs et multi chemins. De plus, ils utilisent les mêmes critères de sélection des chemins que notre protocole: AOMDVxDDR (basé sur la qualité), A-LSEA (basé sur la stabilité) ; ou DTRP et ELE-AOMDV (multi critères).

Nous avons évalué notre protocole dans différents scénarios : le nombre de nœuds du réseau varie entre 50 et 200 nœuds et la vitesse des nœuds est comprise entre 5 m/s et 20 m/s (par incrément de 5 m/). Pour le flux de données, nous avons choisi un échange CBR (Constant Bit Rate) avec un intervalle inter-paquet de 0,2 s (i.e. 5 paquets/s). Le modèle radio utilisé est le WaveLAN de Lucent. Chaque nœud mobile consomme 1000 mW lorsqu'il reçoit un paquet et 1400 mW lors de son émission [5]. L'énergie initiale de chaque nœud est choisie aléatoirement entre 30 et 100 J.

Pour le modèle de bruit utilisé, nous supposons que $\Delta t=1,25$ s (c'est la valeur par défaut du protocole AOMDV) avec une probabilité de changement $P_c=0,03$; cette valeur assure un changement raisonnable de la valeur du bruit dans un environnement urbain. Nous définissons $SNR_{min} = 5$ dB et $SNR_{max} = 20$ dB [42].

Pour les paramètres propres à notre protocole RMSQ-ua, nous avons défini $Thr = 50\%$ (car cela représente une grande probabilité de perte des paquets de données), ceci permet d'éliminer le chemin ayant une faible qualité. Le deuxième paramètre $max_loss = 5$, est le nombre de paquets successifs perdus pour déclarer un lien étant défaillant. Enfin $\sigma=0.6$, afin de favoriser les mesures de distance récentes (plus fraîches). Le reste des paramètres de simulation sont résumés dans le tableau Table 6.

Modèle de mobilité	Paramètres	Valeur
Paramètres communs	Type de canal	Wireless channel
	Protocoles de routage	RMQS-ua; DTRP; AOMDVxDDR; A-LSEA
	Durée de simulation	400 s
	Nombre de nœuds	50/100/200
	Modèle de propagation Radio	Two Ray Ground
	Type d'interface	WirelessPhy
	Type de MAC	IEEE 802.11
	Type Interface queue	DropTail/PriQueue
	Max paquets dans Queue	100
	Surface de simulation	1000 m × 1000 m
	Portée de la transmission	250 m
Random Waypoint	RREP_Wait_Time	0.5 s
	HELLO_Interval	1.25 s
Manhattan Grid	Circular	False
	Nombre de Xblocks, Yblocks	4, 5
	UpdateDist	5.0 s
	TurnProb	0.5
	SpeedChangeProb	0.2
	Vitesse Min et Max	Varies from 5 to 20 m/s
	PauseProb	0.02
	MaxPause	1.0 s
SMOOTH	Nombre de clusters	10
	(α , f_{min} , f_{max})	(2, 50, 500)
	(β , p_{min} , p_{max})	(2, 1, 25)

Table 6. Paramètres de simulation du protocole RMQS-ua

VI.1.5.3.a. Le PDR (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

La Figure 37 montre le taux de livraison des paquets (PDR) par rapport aux vitesses de déplacement des nœuds sur la base du modèle de mobilité Manhattan Grid, pour des réseaux de taille variable : 50, 100 et 200 nœuds. Le PDR reflète la manière dont les protocoles réagissent à la connectivité des liens et évalue la fiabilité de la transmission des données. Les résultats indiquent que RMQS-ua a un taux plus élevé dans tous les scénarios par rapport aux protocoles comparés. Nous observons que le PDR pour tous les protocoles diminue avec l'augmentation de la vitesse vue que les nœuds vont quitter plus rapidement la portée de la transmission.

Le protocole RMQS-ua pour un nombre réduit de nœuds, offre un gain de 10 % par rapport à DTRP et AOMDVxDDR et de 20 % par rapport à ELE-AOMDV. Une fois la vitesse des nœuds augmente, RMQS-ua offre une légère amélioration de 5 % et 8 % par rapport à AOMDVxDDR et DTRP respectivement pour le cas de 50 nœuds, car dans ce cas, les protocoles ont tendance de trouver un seul chemin en raison de l'environnement à restriction (basé sur le modèle Manhattan Grid).

ELE-AOMDV est moins performant en matière de PDR pour un réseau de 200 nœuds par rapport aux autres protocoles en raison de son mécanisme d'évaluation des chemins qui n'inclut aucune métrique de stabilité ou de mobilité. A-LSEA a le plus mauvais résultat de PDR (en particulier pour 50 nœuds), à cause du mécanisme d'élimination des nœuds (basé sur la stabilité et l'énergie des nœuds voisins durant le processus de découverte) ce qui peut entraîner une mauvaise prise de décision. De plus, sa fonction de stabilité offre moins de précision dans un environnement urbain en raison de sa mobilité restreinte et de l'impact de la qualité du signal qui est ignoré. Pour un réseau de 100 et 200 nœuds, notre protocole obtient une amélioration du PDR significative comparativement aux autres protocoles : de 7 % à 12 % par rapport à DTRP, de 7 % à 16 % par rapport à AOMDVxDDR, de 7 % à 25 % par rapport à A-LSEA et de 15 à 20 % par rapport à ELE-AOMDV. Ces résultats montrent que notre protocole RMQS-ua sélectionne le chemin le plus stable avec une meilleure qualité des liens.

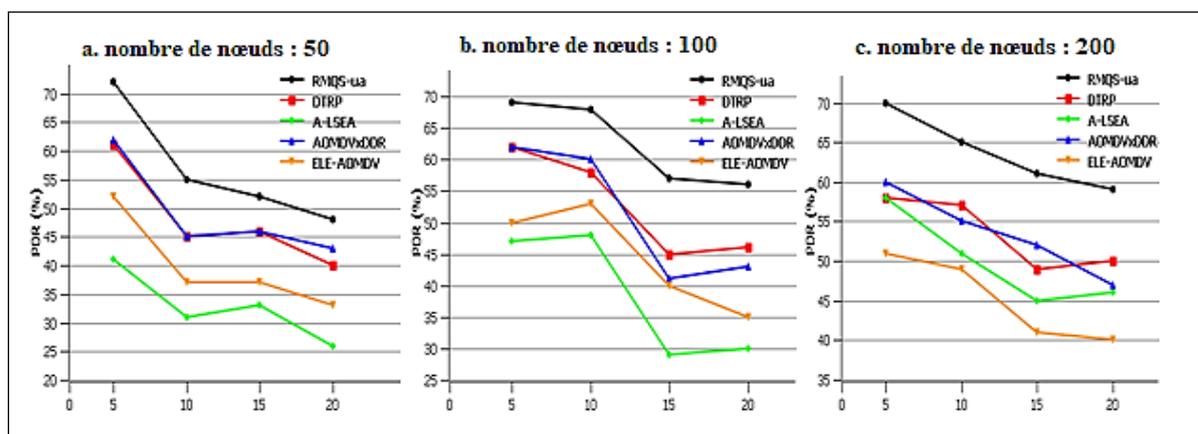


Figure 37. Le PDR vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid

VI.1.5.3.b. Overhead (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

La Figure 38 montre le flux de contrôle (overhead) de tous les protocoles avec de variantes vitesses. Les résultats montrent que notre protocole RMQS-ua réduit le flux de contrôle (dans la plupart des scénarios) : de 10 % à 18 % par rapport à DTRP, de 14 % à 43 % par rapport à A-LSEA, de 24 % à 35 % par rapport à ELE-AOMDV et de 48 % à 53 % par rapport à AOMDVxDDR.

Le protocole AOMDVxDDR génère un overhead très élevé puisqu'il utilise une surveillance active pour évaluer la qualité en générant des messages de contrôle supplémentaires transmis périodiquement ; ainsi, l'utilisation de ces messages en unicast augmente considérablement le flux de contrôle.

Le protocole RMQS-ua réduit considérablement l'overhead par rapport aux autres protocoles, ceci parce qu'il sélectionne les chemins en fonction de la qualité et de la stabilité d'une manière efficace. RMQS-ua minimise le nombre de ruptures des liens ainsi que le nombre de processus de découverte causé par les effets environnementaux qui affectent le signal et les contraintes de mobilité des nœuds dans les milieux urbains.

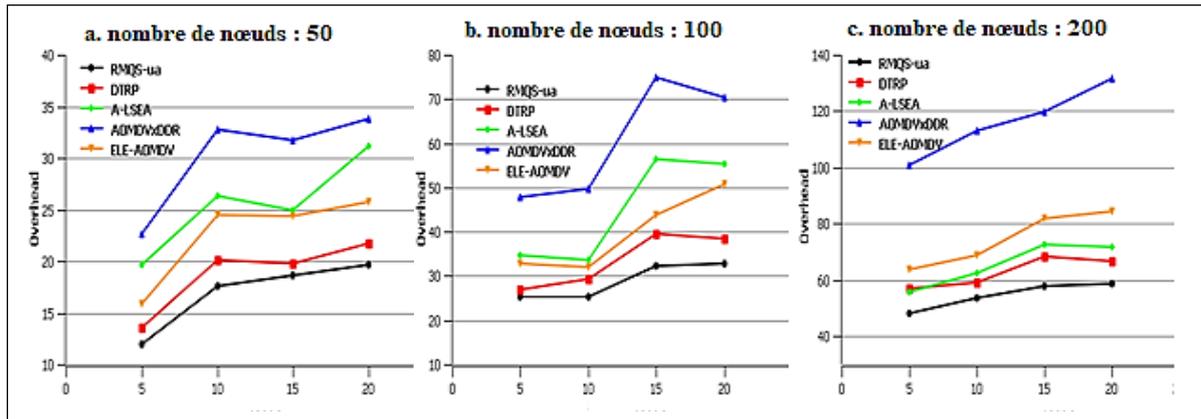


Figure 38. Overhead vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid

VI.1.5.3.c. La consommation d'énergie normalisée (basée sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

La consommation d'énergie normalisée est illustrée pour différentes vitesses des nœuds sur différentes tailles de réseau dans la Figure 39. Nous pouvons constater que le protocole RMQS-ua conserve plus d'énergie par rapport à tous les autres protocoles. Pour 50 nœuds (Figure 39.a), RMQS-ua a une consommation d'énergie normalisée inférieure à 15 % par rapport à DTRP et AOMDVxDDR et 37 % par rapport à A-LSEA. Au fur et à mesure que le nombre de nœuds et la vitesse augmentent, la consommation d'énergie augmente. Pour un réseau de 200 nœuds, RMQS-ua conserve plus d'énergie avec une réduction de sa consommation d'énergie normalisée qui varie entre 10 % et 34 % par rapport à AOMDVxDDR, DTRP et ELE-AOMDV; et atteint un gain de 45 % par rapport à A-LSEA.

Le principe de sélection des chemins du protocole RMQS-ua réduit : les ruptures des liens, le flux de contrôle et la perte des paquets de données, ce qui préserve la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie des nœuds individuels et donc la durée de vie entière du réseau.

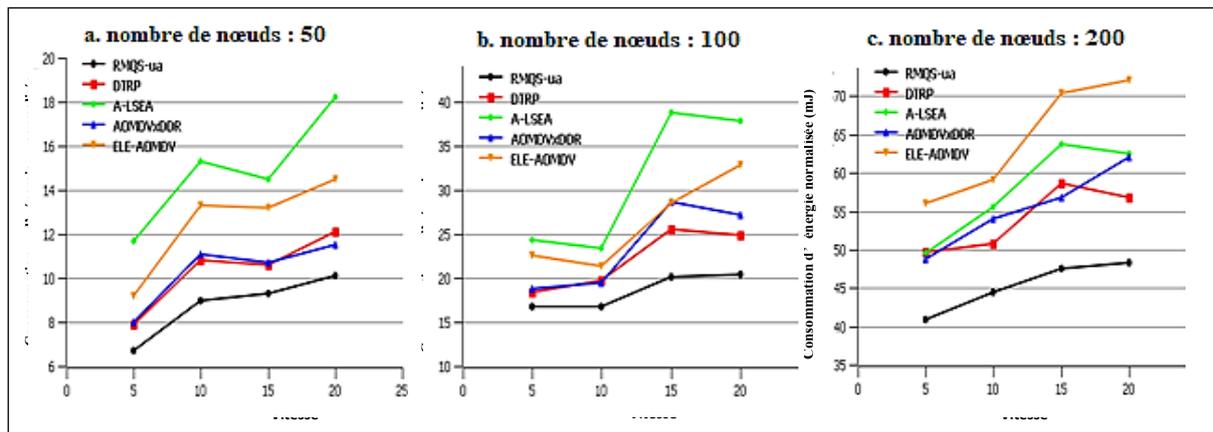


Figure 39. La consommation d'énergie normalisée vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid

VI.1.5.3.d. Le débit (basé sur le modèle de mobilité Manhattan Grid)

La Figure 40 montre l'évaluation de notre protocole RMQS-ua en matière de débit. Les résultats montrent que le protocole RMQS-ua a un débit plus élevé par rapport aux autres

protocoles, car il fournit un meilleur taux de livraison de paquets de données (PDR) vu qu'il utilise un mécanisme d'évaluation et de sélection du chemin basé sur la stabilité et la qualité des liens. On peut noter que RMSQ-ua améliore le débit en moyenne de 15% à 20% par rapport à DTRP et AOMDVxDDR, et de plus de 25% par rapport à A-LSEA et ELE-AOMDV pour la plupart des scénarios.

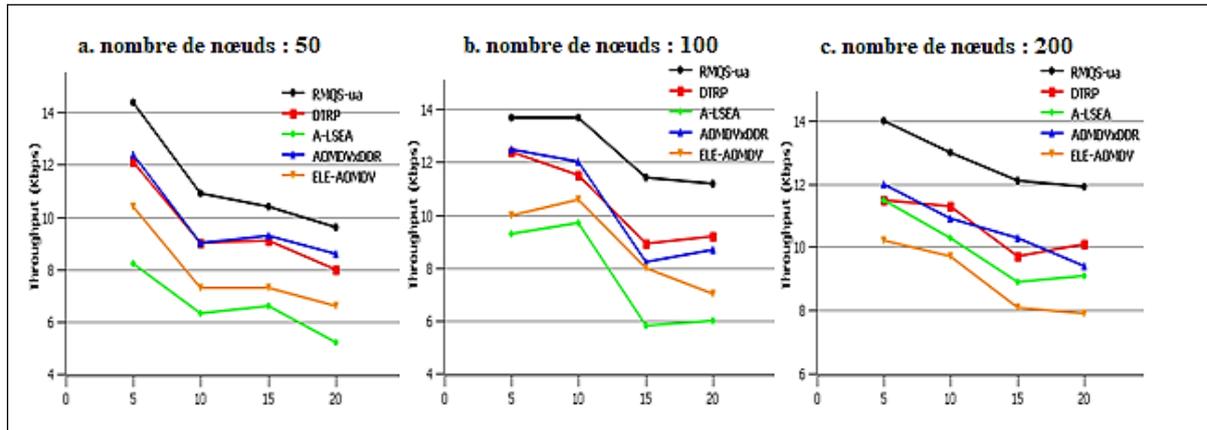


Figure 40. Le débit vs la vitesse des nœuds pour le modèle Manhattan Grid

VI.1.5.3.e. La consommation d'énergie normalisée (basée sur le modèle de mobilité Random Waypoint)

La Figure 41 présente les résultats de simulation de la consommation d'énergie normalisée sur la base du modèle de mobilité Random Waypoint. RMSQ-ua produit de bonnes performances pour ce modèle de mobilité et consomme moins d'énergie par rapport à DTRP, AOMDVxDDR, A-LSEA et ELE-AOMDV, avec une diminution de la consommation d'énergie normalisée de 5 % à 9 %, 6 % à 15 %, 19 % à 36 % et 2 % à 20 % respectivement. Comme nous l'avons mentionné précédemment, A-LSEA produit les plus mauvais résultats pour des réseaux de 50 et 100 nœuds en raison du mécanisme d'élimination des nœuds qui ne s'adapte pas au réseau à faible densité.

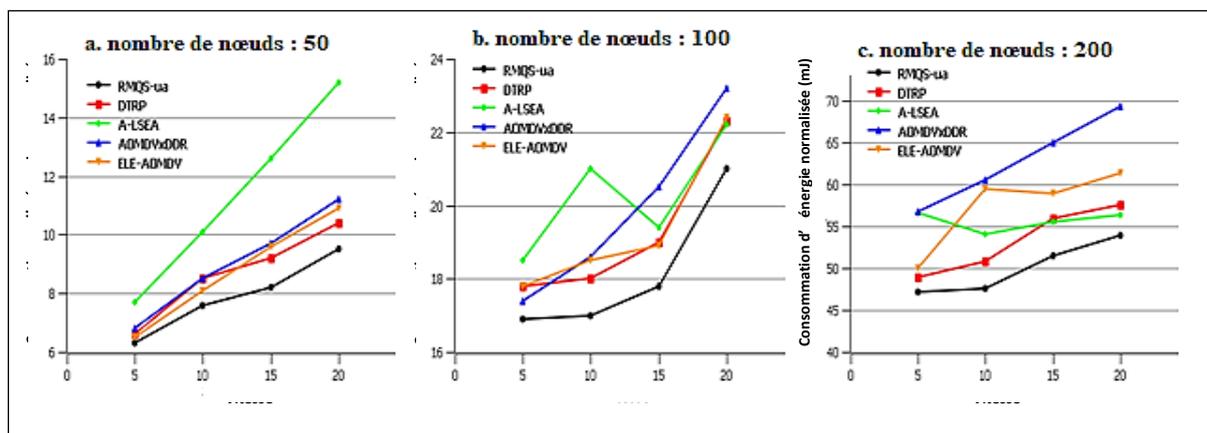


Figure 41. La consommation d'énergie normalisée vs la vitesse des nœuds pour le modèle Random Waypoint

VI.1.5.3.f. Le taux de paquets reçus (basé sur le modèle de mobilité Random Waypoint)

La Figure 42 montre que RMSQ-ua améliore le PDR en le comparant aux protocoles DTRP, AOMDVxDDR et ELE-AOMDV pour un réseau à nombre de nœuds réduit (Figure 42.a), en produisant un gain de 15% à 23 % par rapport à A-LSEA et de 4 % à 7 % par rapport aux autres protocoles. Dans les scénarios de 100 et 200 nœuds, RMSQ-ua offre une amélioration du PDR d'environ 4 % par rapport à DTRP et ELE-AOMDV et un gain varié entre 4 % et 15 % par rapport à A-LSEA et AOMDVxDDR. Dans le cas d'une mobilité à grande vitesse, A-LSEA produit un PDR plus élevé qu'AOMDVxDDR, parce que la mobilité des nœuds est prise en considération dans l'approche du protocole A-LSEA ; mais AOMDVxDDR est basé uniquement sur la métrique de qualité de liaison. On remarque que le mécanisme de stabilité A-LSEA s'adapte mieux au modèle Random Waypoint par rapport au modèle Manhattan Grid.

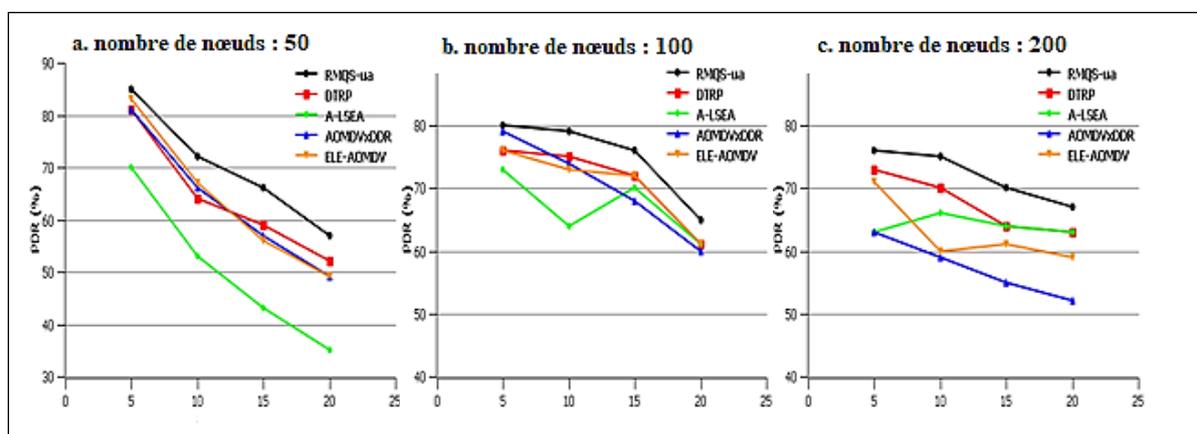


Figure 42. Le PDR vs la vitesse des nœuds pour le modèle Random Waypoint

VI.1.5.3.g. Résultats de simulation (basées sur le modèle de mobilité SMOOTH)

La Figure 43 montre les résultats de simulations de tous les protocoles basés sur le modèle de mobilité SMOOTH. Nous constatons que RMSQ-ua fournit une légère amélioration pour un réseau des 50 nœuds pour toutes les métriques de performance simulées. Dans ce cas de figure (50 nœuds), tous les protocoles ne découvrent qu'un ou deux chemins entre une source et une destination, ce qui minimise l'impact du processus de sélection des chemins. Cependant, RMSQ-ua offre un gain sur le PDR significatif par rapport aux autres protocoles avec une amélioration qui varie de 7 % à 10 % dans la plupart des cas (réseaux de 100 et 200 nœuds). La Figure 43.b présente le flux de contrôle (overhead) pour des différentes tailles de réseaux, RMSQ-ua diminue l'overhead de 45% moins que AOMDVxDDR et de 5% à 9% moins que les autres protocoles. RMSQ-ua réduit également la consommation d'énergie normalisée d'au moins 8% par rapport aux autres protocoles, comme le montre la Figure 43.d.

Enfin, nous constatons que notre protocole RMSQ-ua est fiable et offre de meilleures performances dans de variété de scénarios (mobilité élevée ou faible, différentes tailles de réseaux) et ceci quel que soit le type du modèle de mobilité (environnement urbain, environnement d'espace libre et comportements humains).

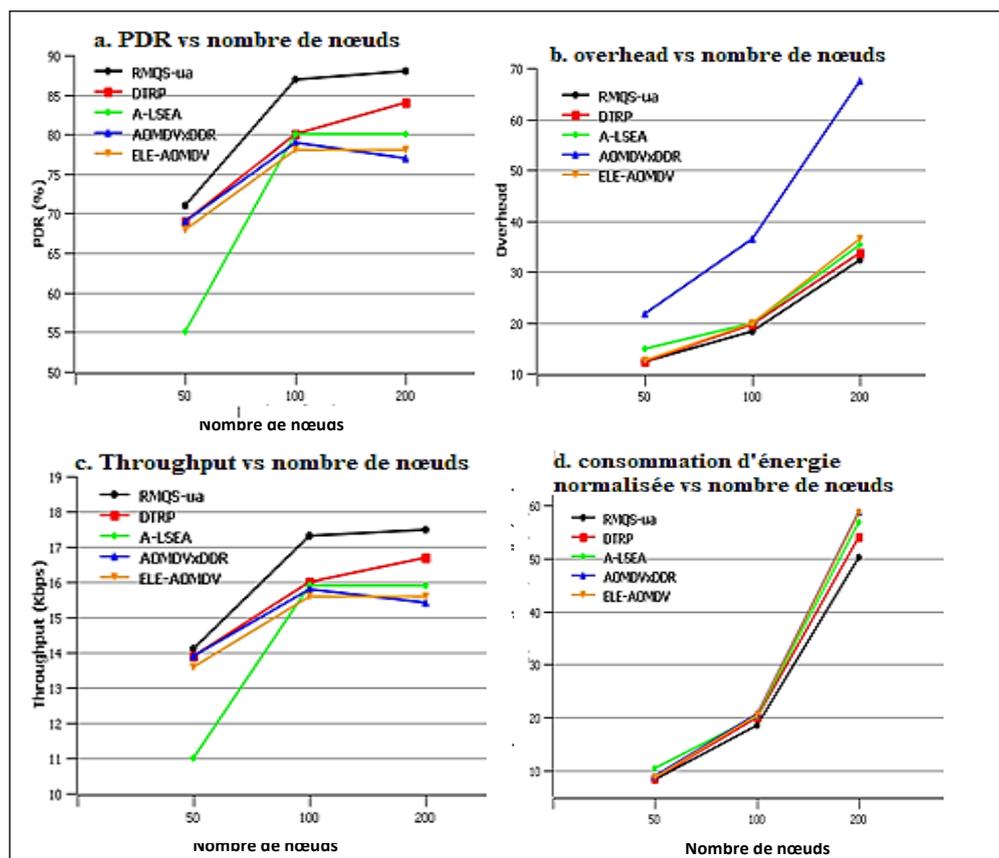


Figure 43. Différentes métriques de performance vs le nombre des nœuds pour le modèle SMOOTH

VI.2. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un nouveau protocole de routage conçu pour les environnements urbains afin d'assurer une transmission fiable de données et améliorer les performances du réseau. Le réseau ad hoc souffre de coupures fréquentes des liens (dû à: la mobilité des nœuds, l'épuisement d'énergie, la dégradation du signal...), ce qui entraîne l'augmentation du taux des paquets perdus d'un côté; d'un autre côté, de la redécouverte des chemins répétitifs, ce qui produit un surcoût important en matière de flux de contrôle, de la bande passante et de l'énergie. La particularité du routage dans un environnement urbain requiert l'utilisation de plusieurs contraintes de sélection de chemins principalement la contrainte de la qualité des liens, à cause de la présence de plusieurs sources de bruit et d'obstacle qui affecte considérablement le signal. De plus la qualité des liens la stabilité des nœuds reste un facteur important, à prendre en considération vu la nature mobile des nœuds d'un réseau ad hoc. Dans ce contexte, nous avons proposé un nouveau protocole de routage multi chemins pour les réseaux ad hoc, RMQS-ua (Reliable Multipath Routing Protocol basé sur la qualité et la stabilité des liaisons dans les zones urbaines). Notre protocole combine deux contraintes pour la sélection des chemins: la qualité et la stabilité des liens, pour assurer la fiabilité de la transmission et améliorer les performances des réseaux. Vu les limites des estimateurs de qualité (LQE), nous avons proposé une nouvelle métrique d'estimation combinant la métrique SNR et une version améliorée de la métrique PRR pour garantir une estimation stable, précise et robuste. Pour valider la performance de notre protocole RMQS-ua, nous l'avons évalué en utilisant trois modèles de mobilité: Random Waypoint pour les

espaces ouverts, Manhattan Grid qui fournit un comportement de mobilité réaliste dans un contexte urbain et SMOOTH qui présente une mobilité de comportement humain. La comparaison des performances de notre protocole RMSQ-ua avec celles des protocoles AOMDVxDDR, DTRP, A-LSEA et ELE-AOMDV, a montré que notre protocole est plus performant en matière de fiabilité de transmission, de réduction de flux de contrôle et de consommation d'énergie.

CHAPITRE VII

Conclusion et Perspectives

VII.1. Conclusion

De nos jours, la majorité des périphériques porte une interface sans fil afin d'exploiter la flexibilité fournie par les réseaux sans fil dont la communication est assurée à tout moment et n'importe où. De plus, l'émergence des applications mobiles est un autre paramètre qui nécessite l'utilisation des réseaux sans fil. Un réseau sans fil peut être soit avec infrastructure qui se compose d'un ensemble des bases liées entre eux à travers un réseau filaire et l'utilisation de réseau sans fil est limitée dans la dernière zone (entre l'utilisateur final et la base), ou sans infrastructure où aucune infrastructure filaire n'est utilisée (totalement sans fil, i.e. le réseau mobile sans fil ou ad hoc). Le réseau ad hoc offre plusieurs avantages : déploiement rapide, économique, la mobilité, etc. Cependant, il est caractérisé par des ressources modestes au niveau des nœuds (l'énergie, la mémoire et la capacité de calcul) et des changements rapides de la topologie.

Vu la nature et les caractéristiques du réseau sans fil mobile, les protocoles de routages classiques du réseau filaire sont inadéquats pour le réseau ad hoc. Le routage dans un réseau ad hoc est alors un véritable challenge dont le protocole de routage doit s'adapter aux différentes caractéristiques : le changement fréquent de la topologie, les capacités de calcul et de stockage limités des nœuds, la consommation d'énergie, une bande passante limitée, la qualité du signal. Quelques protocoles de routage ont été proposés dans ce contexte, ils utilisent le nombre de sauts comme une métrique pour la sélection des chemins; mais il est prouvé que cette métrique n'est pas le bon choix parce qu'il ignore toutes les contraintes qui affectent la fiabilité de la transmission.

Un autre aspect de routage a été introduit qui est le routage multi chemins. Le routage multi chemins est capable de trouver plusieurs chemins contrairement au routage mono chemin. Les chemins multiples peuvent être à liens disjoints (les chemins peuvent avoir des nœuds communs) ou à nœuds disjoints. Le routage multi chemins représente une solution efficace aux plusieurs problèmes : la tolérance aux fautes, la congestion et le partage de la charge.

L'une des contraintes importantes dans un réseau ad hoc est la contrainte d'énergie. Les nœuds dans un réseau ad hoc ont une capacité énergétique limitée (des batteries) qui sera consommée avec le temps. Tout nœud qui épuise son énergie est devient défaillant et quitte immédiatement le réseau. Donc, il ne fait plus partie du réseau et il ne peut ni transmettre ni recevoir des messages ce qui peut conduire à des coupures au niveau des chemins passant par ce nœud. Une mauvaise gestion d'énergie par le protocole de routage peut affecter considérablement la performance du réseau parce que l'augmentation du nombre de nœuds quittant le réseau va créer des zones complètement isolées. De plus, chaque coupure provoque un nouveau processus de découverte des chemins qui consomme plus d'énergie avec un délai

de rétablissement de la communication. L'objectif principal de la prise en compte de l'énergie est d'augmenter la durée de vie des nœuds ainsi que du réseau.

Une autre contrainte critique qui peut poser plus de problèmes est la stabilité. Dans un réseau ad hoc, la mobilité des nœuds conduit à un changement fréquent de la topologie du réseau dont certains liens deviennent invalides (perdus) et d'autres sont créés parce que la zone de couverture des nœuds est limitée. Ce changement provoque des coupures des chemins ce qui invoque à chaque coupure le processus de découverte, consomme plus d'énergie et augmente le taux des paquets perdus vu que la coupure n'est pas détectée en temps réel (le lien est considéré comme perdu si un nœud ne reçoit aucun message de contrôle d'un nœud voisin dans un intervalle de temps). Par conséquent, on peut avoir une dégradation énorme de la performance du réseau en cas de présence des coupures fréquentes. La prise en considération de la stabilité permet de choisir le chemin le plus stable afin d'augmenter la durée de vie du chemin, de conserver les ressources du réseau (l'énergie et la bande passante) et d'assurer une transmission fiable.

En outre, l'environnement peut affecter la performance d'un protocole de routage, qui peut être : espace libre, espace d'intérieur ou zone urbaine. Il existe plusieurs modèles de mobilité qui définissent le comportement de mouvement des nœuds. Certains modèles sont des modèles aléatoires tels que RWP (Random Waypoint), RPG (Reference Point Group), etc. D'autres modèles définissent la mobilité dans une ville telle que le modèle Manhattan Grid, ou les modèles qui définissent la mobilité humaine telle que le modèle SMOOTH.

Les réseaux ad hoc utilisent des transmissions radio pour échanger les informations. Un milieu urbain comme une ville peut contenir des obstacles qui restreignent le déplacement et affecte le signal ; il est caractérisé aussi par la présence de plusieurs sources de signaux, interférences, etc. Dans ce contexte, nous pouvons citer une autre contrainte qui est la qualité de signal qui peut se dégrader significativement à cause de la nature de l'environnement urbain.

Ces dernières années, les recherches s'intéressent à un routage multi objectifs afin d'assurer une transmission fiable et améliorer les performances des réseaux. L'objectif principal de notre thèse est de développer un protocole de routage fiable et stable pour les réseaux sans fil mobiles dans un environnement réaliste (milieu urbain). En premier temps, nous avons commencé par une étude sur les protocoles de routages présents dans la littérature en donnant la classification des différents protocoles de routage selon le principe de découverte ainsi que la structure du réseau. En deuxième lieu, nous avons décrit le principe de routage multi chemins en présentant quelques solutions multi chemins. Ensuite, nous avons discuté les deux contraintes : l'énergie et la stabilité en présentant un état de l'art de certains protocoles de routages existants basés sur l'une de ces deux contraintes. Dans le chapitre 5, nous avons étudié la qualité de signal, la classification et la définition des différents estimateurs de qualité (LQE) existants ainsi qu'une étude comparative entre eux. Cette étude nous a permis d'analyser les différents estimateurs et de proposer un nouveau estimateur combiné.

Notre premier apport personnel est un protocole de routage multi chemins ESMRsc (Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol in Smart City), qui est basé sur deux

contraintes : la stabilité et l'énergie. Notre protocole est basé sur le protocole de base AOMDV permettant de trouver des chemins multiples à liens disjoints entre un nœud source et un nœud de destination. Chaque nœud calcule périodiquement la stabilité des liens de ses voisins en fonction de leur mobilité (la variation de la distance). Durant le processus de découverte, on calcul pour chaque chemin le cout de stabilité qui représente la valeur de stabilité maximale des liens composant le chemin et l'énergie minimale du chemin (prenant en compte l'énergie restante et le taux de consommation). À la fin du processus de découverte, le nœud source évalue le chemin en combinant les valeurs de la stabilité et de l'énergie, afin de sélectionner le meilleur entre eux. Les simulations ont été effectuées sur le simulateur NS2 en se basant sur deux modèles de mobilité : RWP et Manhattan. Les résultats montrent que notre protocole consomme moins d'énergie et améliore le taux de livraison des paquets de données.

Une extension du protocole ESMRsc est proposée, nommée ESMRua (Efficient energy aware and Link Stable Multipath Routing Protocol in urban areas) qui se base sur le même principe, mais il utilise trois variantes pour calculer la stabilité. Comme le protocole ESMRsc, les valeurs de la stabilité et l'énergie sont collectés lors du processus de découverte. Un nouveau coefficient est introduit indiquant la qualité du signal de chaque chemin. Le meilleur chemin est le chemin qui a une valeur maximale de la fonction objective qui combine les deux contraintes utilisées. Nous avons évalué les performances en se basant sur deux modèles de mobilités RWP et Manhattan. L'évaluation a montré que le protocole ESMRua consomme moins d'énergie, augmente le taux de livraison de paquet et réduit le flux de contrôle généré (overhead).

Notre dernière proposition est un protocole de routage fiable multi chemins et réactif basé sur la stabilité et la qualité des liens pour les réseaux ad hoc dans les milieux urbains, nommé RMSQ-ua (Reliable Multipath Routing Protocol based on Link Quality and Stability in Urban Areas).RMSQ-ua prend en compte deux contraintes: la stabilité et la qualité des liens. Nous avons vu qu'une seule métrique de qualité du signal est insuffisante pour bien estimer la qualité. Par conséquent, nous avons proposé un nouveau estimateur qui combine deux métriques de qualité : le SNR (Signal Noise Ratio) et le PRR (Packet Reception Ratio) afin d'améliorer la précision de l'estimateur de la qualité. Le nœud source reçoit pour chaque chemin la valeur de la stabilité et de la qualité qui sont combinées par une fonction objective pour classer les chemins trouvés. Le chemin choisi est le chemin le plus stable qui fournit une meilleure qualité. De plus, nous avons défini un seuil qui représente la valeur acceptable de la valeur objective afin d'assurer que les chemins seront de bonnes qualités (pour éviter les pertes de paquets de données).Nous avons évalué les performances de notre protocole dans le cas des trois modèles de mobilités RWP, Manhattan et SMOOTH. La combinaison des contraintes choisies a permet d'éviter les chemins instables ou qui ont une mauvaise qualité ceci assurer une transmission fiable et minimiser le nombre des coupures, et par conséquent réduit le flux de contrôle.

VII.2. Perspectives

Dans la continuité du travail présenté, nous proposons les perspectives suivantes:

- Notre contribution est basée principalement sur le processus de sélection et d'évaluation des chemins basé sur plusieurs contraintes. Il est intéressant d'anticiper dans le processus de découverte par une conception de la construction des chemins en tenant compte plusieurs contraintes tel que la stabilité, la qualité du lien, etc.
- Un autre axe de recherche est la tolérance aux fautes, nous pouvons intégrer dans nos solutions un processus de maintenance plus efficace permettant de rétablir le chemin coupé vu que même les chemins alternatifs peuvent être invalidés,
- Appliquer des méthodes bio-inspirées dans le processus de découverte et de sélection des chemins tels que l'algorithme des abeilles, la colonie de fourmis et les algorithmes génétiques, etc. Ces algorithmes représentent une solution efficace pour les problèmes complexe et des problèmes d'optimisation qui peuvent être impliqués dans le routage dans un réseau ad hoc pour trouver le chemin optimal.
- Étudier le routage pour de diverse : vidéo streaming, les applications industrielles, etc.
- Proposer des extensions des protocoles conçus pour contenir les réseaux à nœuds multi-interfaces.

Bibliographie

- [1] K. Saddiki, “Denial of services attack in wireless networks,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2019.
- [2] S. Othmen, F. Zarai, A. Belghith, and L. Kamoun, “Energy , Load , and QoS-aware Routing Protocol for Ad Hoc Networks,” in *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCM 2016)*, 2016, pp. 886–891, doi: 10.1109/IWCMC.2016.7577175.
- [3] S. Chettibi, “Protocole de routage avec prise en compte de la consommation d’énergie pour les réseaux mobiles ad-hoc,” Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [4] A. I. Djebbar, “Gestion de Tolerance aux fautes dans les réseaux ad hoc a base des systemes multi agent,” Mémoire de Magister, Université d’Oran, 2010.
- [5] O. Smail, “Routage multipath dans les réseaux ad hoc,” Thèse de Doctorat, Université USTO Mohamed Boudiaf, 2015.
- [6] A. Boudries, “Maintien de la Connectivité dans les Réseaux Ad hoc sans fil,” Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2014.
- [7] G. Singal, V. Laxmi, V. Rao, S. Todi, and M. S. Gaur, “Improved multicast routing in MANETs using link stability and route stability,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 30, no. 11, pp. 1–15, 2017, doi: 10.1002/dac.3243.
- [8] S. Bitam, “Une nouvelle approche pour la découverte de la topologie dans les réseaux mobiles ad hoc inspirée de la communication dans les essaims d’abeilles,” Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2011.
- [9] A. Moussaoui and A. Boukeream, “A survey of routing protocols based on link-stability in mobile ad hoc networks,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 47, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.jnca.2014.09.007.
- [10] N. Boukhechem, “Routage dans les réseaux mobiles ad hoc par une approche a base d’agents,” Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2008.
- [11] H. Agrawal, P. Johri, and A. Kumar, “Emerging trends in energy efficient routing protocols,” in *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA 2015)*, 2015, pp. 523–528, doi: 10.1109/CCAA.2015.7148433.
- [12] S. Fellah, “Optimisation multiobjectif appliquée au déploiement et la performance des réseaux sans fil,” Thèse de Doctorat, Université d’Oran 1 Ahmed Ben Bella, 2018.
- [13] A. A. Korba, “Détection d’Intrusion et Sécurisation du Routage dans les Réseaux Ad hoc,” Thèse de Doctorat, Université d’Annaba, 2016.
- [14] S. R. Malwe, N. Taneja, and G. P. Biswas, “Enhancement of DSR and AODV Protocols Using Link Availability Prediction,” *Wirel. Pers. Commun.*, pp. 4451–4466, 2017, doi: 10.1007/s11277-017-4733-y.
- [15] P. Periyasamy and E. Karthikeyan, “End-to-End Link Reliable Energy Efficient Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 92, no. 3, pp. 825–841, 2017, doi: 10.1007/s11277-016-3579-z.
- [16] O. Smail, B. Cousin, R. Mekki, and Z. Mekkakia, “A multipath energy-conserving routing protocol for lifetime improvement of wireless ad hoc networks,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, 2014, doi: 10.1186/1687-1499-2014-139.
- [17] S. E. Benatia, S. Omar, B. Meftah, and B. Cousin, “ESMRsc: Energy Aware and Stable Multipath Routing Protocol for Ad Hoc Networks in Smart City,” in *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 2018, vol. 62, pp. 31–42, doi: 10.1007/978-3-030-04789-4.
- [18] M. K. Marina and S. R. Das, “On-demand multipath distance vector routing in ad hoc

- networks,” in *Ninth International Conference on Network Protocols ICNP 2001*, 2001, pp. 14–23, doi: 10.1109/ICNP.2001.992756.
- [19] S. E. Benatia, O. Smail, B. Meftah, M. Rebbah, and B. Cousin, “An efficient energy aware link stable multipath routing protocol for mobile ad hoc networks in urban areas,” *Telfor J.*, vol. 12, no. 1, pp. 2–7, 2020, doi: 10.5937/telfor2001002e.
- [20] S. E. Benatia, O. Smail, B. Meftah, M. Rebbah, and B. Cousin, “A Reliable Multipath Routing Protocol Based on Link Quality and Stability for MANETs in Urban Areas,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 113, 2021, doi: 10.1016/j.simpat.2021.102397.
- [21] B. Tian, “Protocole de Dissémination de données et Modèle de Mobilité pour Réseaux Ad hoc Véhiculaires,” Thèse de Doctorat, Université de Blaise Pascal Clermont 2, 2016.
- [22] I. Bambrik, “Etude De La QoS Dans Les Réseaux MANET et WMN,” Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2016.
- [23] T. Nebbou, “Les protocoles de routage géographique et les services de localisation dans les réseaux VANETS,” Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2019.
- [24] M. Tahar Abbes, “Proposition d’un protocole à économie d’énergie dans un réseau hybride GSM et AD HOC,” Thèse de Doctorat, Université d’Oran 1 Ahmed Ben Bella, 2012.
- [25] I. Doghri, “Stratégies de routage multi-chemin dans les réseaux sans fil multi-sauts,” Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2012.
- [26] F. Grandhomme, “Etudes de protocole de routage externe de type BGP dans un environnement réseaux tactiques adhoc mobiles : faisabilité et performances,” Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 2017.
- [27] C. E. Perkins and P. Bhagwat, “Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers,” 1994, doi: 10.1145/190314.190336.
- [28] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot, “Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks,” in *International Multi Topic Conference (INMIC 2001)*, 2001, pp. 62–68, doi: 10.5121/ijwmn.2012.4119.
- [29] A. Kout, “Contributions à la Résolution du Problème de Routage dans les Réseaux Mobiles Ad-hoc par les Méthodes Bio-inspirées,” Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Mehri - Constantine 2, 2017.
- [30] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Brosh, “DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc,” in *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., 2001, pp. 139–172.
- [31] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing,” in *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications WMCSA’99*, 1999, pp. 90–100, doi: 10.1109/MCSA.1999.749281.
- [32] A. Pal, P. Dutta, A. Chakrabarti, J. P. Singh, and S. Sadhu, “Biogeographic-Based Temporal Prediction of Link Stability in Mobile Ad Hoc Networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, pp. 217–233, 2019, doi: 10.1007/s11277-018-6016-7.
- [33] N. A. Husieen, A. Abdul Hadi, A. Tahsien Ali, and S. Ghassan Fadhil, “Improvement the Route Discovery Mechanism of Dynamic Source Routing Protocol in MANET Improvement the Route Discovery Mechanism of Dynamic Source Routing Protocol in MANET,” in *International Conference on Distributed Computing and High Performance Computing (DCHPC 2018)*, 2019, pp. 1–12.
- [34] M. Tarique and K. E. Tepe, “Minimum energy hierarchical dynamic source routing for Mobile Ad Hoc Networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 1125–1135, 2009, doi: 10.1016/j.adhoc.2008.10.002.
- [35] M. N. R. Rakotondravelona, “Utilisation d’une autostructuration pour un routage hiérarchique géographique dans les réseaux sans fil ad hoc,” Thèse de Doctorat,

- Université de la Réunion, 2017.
- [36] Z. J. Haas and M. R. Pearlman, “The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks,” <https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-zone-zrp-02.txt>, 2002. .
 - [37] H. N. Saha, D. Bhattacharyya, B. Banerjee, S. Mukherjee, R. Singh, and D. Ghosh, “Different Routing Protocols and Their Vulnerabilities and Their Measures,” in *Intl. Conf. on Advances in Computer Science and Electronics Engineering (CSEE 2014)*, 2014, pp. 192–202, doi: 10.15224/978-1-63248-000-2-69.
 - [38] I. G. Shayeb, A. H. Hussein, and A. B. Nasoura, “A Survey of Clustering Schemes for Mobile Ad-Hoc Network (MANET),” *Am. J. Sci. Res.*, no. 2, pp. 135–151, 2011.
 - [39] J. Mingliang, L. Jinyang, and Y. . Tay, “Cluster Based Routing Protocol (CBRP),” 1999. <https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-cbrp-spec-00.txt> (accessed Feb. 01, 2018).
 - [40] J. Yi, E. Cizeron, S. Hamma, and B. Parrein, “Simulation and Performance Analysis of MP-OLSR for Mobile Ad hoc Networks,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2008, pp. 2235–2240, doi: 10.1109/WCNC.2008.395.
 - [41] L. Zhang, Z. Zhao, Y. Shu, L. Wang, and O. W. W. Yang, “Load Balancing of Multipath Source Routing in Ad Hoc Networks,” in *International Conference on Communications (ICC 2002)*, 2002, pp. 3197–3201, doi: 10.1109/ICC.2002.997425.
 - [42] J. Yi, A. Adnane, S. David, and B. Parrein, “Ad Hoc Networks Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 9, pp. 28–47, 2011, doi: 10.1016/j.adhoc.2010.04.007.
 - [43] J. Yi, “Protocole de routage à chemins multiples pour des réseaux ad hoc,” Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2010.
 - [44] R. Prasad P and Shivashankar, “Improvement of Battery Lifetime of Mobility Devices using Efficient Routing Algorithm,” *Asian J. Eng. Technol. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 13–20, 2017, doi: 10.18311/ajeta/2017/8527.
 - [45] E. Tsiontsiou, “Multi-constrained QoS Routing and Energy Optimization for Wireless Sensor Networks,” Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2017.
 - [46] F. Muchtar, A. H. Abdullah, S. Hassan, and F. Masud, “Energy conservation strategies in Host Centric Networking based MANET: A review,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 111, pp. 77–98, 2018, doi: 10.1016/j.jnca.2018.03.020.
 - [47] L. M. Feeney and M. Nilsson, “Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment,” in *IEEE INFOCOM Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society*, 2001, vol. 3, pp. 1548–1557, doi: 10.1109/infcom.2001.916651.
 - [48] A. Rama Rao, S. Reddy, and V. Valli Kumari, “Multi-path selection based on fractional cuckoo search algorithm for QoS aware routing in MANET,” *Sens. Rev.*, vol. 39, no. 2, pp. 218–232, 2019, doi: 10.1108/SR-08-2017-0170.
 - [49] R. Torres, F. A. Sandoval, L. Enciso, and S. Cueva, “Improving Lifetime and Availability for Ad Hoc Networks to Emergency and Rescue Scenarios Improving lifetime and availability for ad hoc networks to emergency and rescue scenarios,” in *New Contributions in Information Systems and Technologies*, Springer, Cham, 2015, pp. 979–89.
 - [50] U. Rashid, O. Waqar, and A. K. Kiani, “Mobility and energy aware routing algorithm for mobile ad-hoc networks,” in *International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2017)*, 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICEE.2017.7893434.
 - [51] W. A. Jabbar, M. Ismail, R. Nordin, and S. Arif, “Power-efficient routing schemes for MANETs: a survey and open issues,” *Wirel. Networks*, pp. 1917–1952, 2017, doi: 10.1007/s11276-016-1263-6.

- [52] V. K. Quy, V. H. Nam, and D. M. Linh, "A survey of state-of-the-art energy efficiency routing protocols for MANET," *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 14, no. 9, pp. 215–226, 2020, doi: 10.3991/ijim.v14i09.13939.
- [53] V. Arya and C. Gandhi, "Energy aware routing protocols for mobile ad hoc networks-a survey," *Int. J. Inf. Commun. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 662–675, 2015, doi: 10.1504/IJICT.2015.072045.
- [54] L. Cao, T. Dahlberg, and Y. Wang, "Performance Evaluation of Energy Efficient Ad Hoc Routing Protocols," in *International Performance, Computing, and Communications Conference*, 2007, pp. 306–313, doi: 10.1109/PCCC.2007.358908.
- [55] P. R. More and S. V. Sankpal, "Energy aware routing using energy efficient routing protocol in wireless Ad hoc network," in *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT 2016)*, 2016, pp. 1258–1261, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754885.
- [56] J. Zhu and X. Wang, "PEER: A Progressive Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks," in *24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2005, pp. 1887–1896, doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498467.
- [57] T. Liu, X. Gu, and S. Shi, "An improved energy-saving routing protocol for wireless ad hoc networks," in *International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN 2015)*, 2015, pp. 250–254, doi: 10.1109/ICCSN.2015.7296164.
- [58] O. Smail and M. Rebbah, "Networks Lifetime Maximization In Ad Hoc Wireless Networks With Link-Disjoint Paths Routing," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 1065–1071, 2018.
- [59] P. Parthiban, G. Sundararaj, and P. Maniirasan, "Maximizing the Network Life Time Based on Energy Efficient Routing in Ad Hoc Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 101, no. 2, pp. 1143–1155, 2018, doi: 10.1007/s11277-018-5753-y.
- [60] D. Kim, S. Member, K. Obraczka, J. Cano, and P. Manzoni, "Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks Based on the Energy Drain Rate," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 161–173, 2003, doi: 10.1109/TMC.2003.1217236.
- [61] M. Bheemalingaiah, M. Naidu, D. Sreenivasa Rao, and P. Vishvapathi, "Energy Aware On-Demand Multipath Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks," *Int. J. Comput. Networks Wirel. Commun.*, vol. 6, no. 5, pp. 14–31, 2016.
- [62] N. B. Bhople and J. M. Waghmare, "Energy Routing Protocol with Power Utilization Optimization in MANET," in *International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016, pp. 1371–1374, doi: 10.1109/RTEICT.2016.7808055.
- [63] Shivashankar, H. N. Suresh, G. Varaprasad, and G. Jayanthi, "Designing energy routing protocol with power consumption optimization in MANET," *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 192–197, 2014, doi: 10.1109/TETC.2013.2287177.
- [64] F. De Rango, M. Fotino, and S. Marano, "EE-OLSR: Energy efficient OLSR routing protocol for mobile ad-hoc networks," in *IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2008)*, 2008, pp. 1–7, doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753611.
- [65] P. Nayak, R. Agrawal, and S. Verma, "Energy Aware Routing Scheme For Mobile Ad hoc Network using Variable Range Transmission," *Int. J. Ad hoc, Sens. Ubiquitous Comput.*, vol. 3, no. 4, pp. 53–63, 2012, doi: 10.5121/ijasuc.2012.3406.
- [66] S. Alani, Z. Zakaria, and H. Lago, "A new energy consumption technique for mobile Ad-Hoc networks," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 4147–4153, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i5.pp4147-4153.
- [67] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, "Span: An Energy-Efficient

- Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks,” *Wirel. Networks*, pp. 481–494, 2002, doi: 10.1023/A:1016542229220.
- [68] M. Ali Cherif and S. B. Hacene, “An energy-conserving predictive preemptive multipath routing protocol for adhoc networks: A lifetime improvement,” *Int. J. Commun. Networks Inf. Secur.*, vol. 8, no. 1, pp. 31–39, 2016, doi: 10.54039/ijcnis.v8i1.1009.
- [69] S. A. Alghamdi, “Load balancing ad hoc on-demand multipath distance vector (LBAOMDV) routing protocol,” *J. Wirel. Commun. Netw.*, 2015, doi: 10.1186/s13638-015-0453-8.
- [70] G. Singal, V. Laxmi, M. S. Gaur, and V. Rao, “Moralism: mobility prediction with link stability based multicast routing protocol in MANETs,” *Wirel. Networks*, pp. 663–679, 2017, doi: 10.1007/s11276-015-1186-7.
- [71] H. Zhang and L. Dai, “Mobility Prediction: A Survey on State-of-the-Art Schemes and Future Applications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 802–822, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885821.
- [72] R. Suraj, S. Tapaswi, S. Yousef, K. K. Pattanaik, and M. Cole, “Mobility prediction in mobile ad hoc networks using a lightweight genetic algorithm,” *Wirel. Networks*, vol. 22, no. 6, pp. 1797–1806, 2016, doi: 10.1007/s11276-015-1059-0.
- [73] A. Bisengar, O. Zytoune, M. Rziza, M. Ouadou, and D. Aboutajdine, “A routing protocol based on mobility prediction for mobile ad hoc networks,” *J. Commun. Softw. Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 24–29, 2014, doi: 10.24138/jcomss.v10i1.137.
- [74] W. Zhu, M. Song, and S. Olariu, “Integrating Stability Estimation into Quality of Service Routing in Mobile Ad-hoc Networks,” in *14th IEEE International Workshop on Quality of Service*, 2006, pp. 122–129, doi: 10.1109/IWQOS.2006.250459.
- [75] M. Lee and S. Lee, “A Link Stability Model and Stable Routing for Mobile A Link Stability Model and Stable Routing for Mobile Ad-Hoc Networks,” in *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2006, pp. 904–913.
- [76] W. Su, S. Lee, and M. Gerla, “Mobility prediction in wireless networks,” in *21st Century Military Communications. Architectures and Technologies for Information Superiority*, 2000, pp. 491–495, doi: 10.1109/MILCOM.2000.905001.
- [77] A. Naushad, G. Abbas, Z. H. Abbas, and A. Pagourtzis, “Novel strategies for path stability estimation under topology change using Hello messaging in MANETs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 87, pp. 76–99, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.12.005.
- [78] A. Zadin and T. Fevens, “Maintaining path stability with node failure in mobile Ad Hoc networks,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 19, pp. 1068–1073, 2013, doi: 10.1016/j.procs.2013.06.150.
- [79] A. P. Reddy and N. Satyanarayana, “Energy-efficient stable multipath routing in MANET,” *Wirel. Netw.*, vol. 23, pp. 2083–2091, 2017, doi: 10.1007/s11276-016-1220-4.
- [80] N. Wang and C. Lee, “A reliable QoS aware routing protocol with slot assignment for mobile ad hoc networks,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 1153–1166, 2009, doi: 10.1016/j.jnca.2009.06.001.
- [81] A. Swidan, H. B. Abdelghany, R. Saifan, and Z. Zilic, “Mobility and Direction Aware Ad-hoc on Demand Distance Vector Routing Protocol,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 94, pp. 49–56, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.08.011.
- [82] F. Bai and A. Helmy, “A Survey of Mobility Models in Wireless Adhoc Networks,” in *Wireless Ad Hoc Networks*, 2004, pp. 1–30.
- [83] L. Ghouti, “Mobility prediction in mobile ad hoc networks using neural learning machines,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 66, pp. 104–121, 2016, doi: 10.1016/j.simpat.2016.03.001.

- [84] M. Appiah, “The impact of mobility models on the performance of mobile ad hoc network (MANET),” in *International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, 2016, pp. 208–213, doi: 10.1109/ICACCE.2016.8073749.
- [85] A. Soni, P. Jharia, and S. Chouhan, “Energy Contribution of Control Packets of AODV in Various Mobility Models in MANET,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 462, Springer Singapore, 2018, pp. 711–718.
- [86] F. Ahmed and M. S. Rahim, “Performance Investigation on Two-Classes of Manet Routing Protocols Across Various Mobility Models With QoS Constraints,” *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 3, no. 2, pp. 197–215, 2011, doi: 10.5121/ijcnc.2011.3213.
- [87] A. Munjal, T. Camp, and W. C. Navidi, “SMOOTH: A Simple Way to Model Human Mobility,” in *14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '11)*, 2011, pp. 351–360, doi: 10.1145/2068897.2068957.
- [88] S. Mallapur and S. R. Patil, “Route stability based on demand multipath routing protocol for mobile Ad Hoc networks,” in *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP 2014)*, 2014, pp. 1859–1863, doi: 10.1109/ICCSP.2014.6950167.
- [89] A. Sahnoun, A. Habbani, and J. El Abbadi, “EEPR-OLSR: An energy efficient and path reliability protocol for proactive mobile Ad-hoc network routing,” *Int. J. Commun. Networks Inf. Secur.*, vol. 9, no. 1, pp. 22–29, 2017.
- [90] W. A. Jabbar, M. Ismail, and R. Nordin, “Energy and mobility conscious multipath routing scheme for route stability and load balancing in MANETs,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 77, pp. 245–271, 2017, doi: 10.1016/j.simpat.2017.07.001.
- [91] M. Er-rouidi, H. Moudni, F. Hassan, H. Mouncif, and A. Merbouha, “A Fuzzy-Based Routing Strategy to Improve Route Stability in MANET Based on AODV,” in *International Conference on Networked Systems NETYS 2017*, 2017, pp. 40–48, doi: 10.1007/978-3-319-59647-1_4.
- [92] S. Hasdemir, S. Yilmaz, and S. Sen, “A novel multi-featured metric for adaptive routing in mobile ad hoc networks,” *Appl. Intell.*, vol. 49, no. 8, pp. 2823–2841, 2019, doi: 10.1007/s10489-018-01401-4.
- [93] D. Jinil Persis and T. Paul Robert, “Ant based multi-objective routing optimization in mobile AD-HOC network,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 9, pp. 875–888, 2015, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i9/59369.
- [94] H. Nasehi, N. Taheri Javan, A. B. Aghababa, and Y. Ghanbari Birgani, “Improving Energy Efficiency in MANETs by Multi-Path Routing,” *Int. J. Wirel. Mob. Networks*, vol. 5, no. 1, pp. 163–176, 2013, doi: 10.5121/ijwmn.2013.5113.
- [95] “The Network Simulator NS2.” <https://www.isi.edu/nsnam/ns/> (accessed Mar. 20, 2020).
- [96] S. GoRAR, “Revisiting a 90-year-old debate: the advantages of the mean deviation,” *Br. J. Educ. Stud.*, vol. 53, no. 4, pp. 417–430, 2005, doi: 10.1111/j.1467-8527.2005.00304.x.
- [97] T. Pham-Gia and T. L. Hung, “The mean and median absolute deviations,” *Math. Comput. Model.*, vol. 34, no. 7–8, pp. 921–936, 2001, doi: 10.1016/S0895-7177(01)00109-1.
- [98] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar, S. A. Razak, and M. Lee, “Network initialization in low-power wireless networks: A comprehensive study,” *Comput. J.*, vol. 57, no. 8, pp. 1238–1261, 2014, doi: 10.1093/comjnl/bxt074.
- [99] N. Baccour, A. Koubaa, H. Youssef, and M. Alves, “Reliable link quality estimation in

- low-power wireless networks and its impact on tree-routing,” *Ad Hoc Networks*, vol. 27, pp. 1–25, 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2014.11.011.
- [100] J. B. Hughes, “Real-time Link Quality Estimation and Holistic Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks,” Thèse de Doctorat, Université de Huddersfield, 2018.
- [101] N. Baccour *et al.*, “Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: a Survey,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–33, 2012, doi: 10.1145/2240116.2240123.
- [102] A. Ben Ammar, “Approche cross-layer pour la minimisation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil,” Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Informatique Télécommunication et Electronique de Paris, 2018.
- [103] A. Bildea, “Link Quality in Wireless Sensor Networks,” Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- [104] A. F. Tandjaoui, “Optimisation des Réseaux Sans Fil Maillés,” Thèse de Doctorat, Université d’Oran 1 Ahmed Ben Bella, 2017.
- [105] C. J. Lowrance and A. P. Lauf, “Link Quality Estimation in Ad Hoc and Mesh Networks: A Survey and Future Directions,” *Wirel. Pers. Commun.*, pp. 475–508, 2017, doi: 10.1007/s11277-017-4180-9.
- [106] M. Deb, S. Roy, B. Saha, P. Das, and M. Das, “Designing a new link quality estimator for sensor nodes by combining available estimators,” in *7th IEEE International Advanced Computing Conference, IACC 2017*, 2017, pp. 179–183, doi: 10.1109/IACC.2017.0049.
- [107] M. A. Moridi, M. Sharifzadeh, Y. Kawamura, and H. D. Jang, “Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments),” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 73, pp. 127–138, 2018, doi: 10.1016/j.tust.2017.12.015.
- [108] S. Jian, L. Song, L. Linlan, Z. Liqin, and H. Gang, “Research on link quality estimation mechanism for wireless sensor networks based on support vector machine,” *Chinese J. Electron.*, vol. 26, no. 2, pp. 377–384, 2017, doi: 10.1049/cje.2017.01.013.
- [109] L. Hong, X. Liu, L. Zhang, and W. Chen, “Towards sensitive link quality prediction in ad hoc routing protocol based on grey theory,” *Wirel. Networks*, pp. 2315–2325, 2015, doi: 10.1007/s11276-015-0918-z.
- [110] S. Naimi, A. Busson, V. Vèque, and R. Bouallegue, “Metric anticipation to manage mobility in mobile mesh and ad hoc wireless networks,” *Ann. Telecommun.*, vol. 73, pp. 787–802, 2018, doi: 10.1007/s12243-018-0666-z.
- [111] A. T. Tran, D. D. Mai, and M. K. Kim, “Link quality estimation in static wireless networks with high traffic load,” *J. Commun. Networks*, vol. 17, no. 4, pp. 370–383, 2015, doi: 10.1109/JCN.2015.000068.
- [112] A. Vlavianos, L. K. Law, I. Broustis, S. V. Krishnamurthy, and M. Faloutsos, “Assessing link quality in IEEE 802.11 wireless networks: Which is the right metric?,” in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699837.
- [113] A. Woo and D. Culler, “Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks,” pp. 1–20, 2004, [Online]. Available: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2003/CSD-03-1270.pdf>.
- [114] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks,” in *10th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom ’04)*, 2004, pp. 114–128, doi: 10.1145/1023720.1023732.
- [115] S. Naimi, “Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage,” Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2015.

- [116] S. Bindel, S. Chaumette, and B. Hilt, “F-ETX: An enhancement of ETX metric for wireless mobile networks,” in *International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Aircraft 2015)*, 2015, vol. 9066, pp. 35–46, doi: 10.1007/978-3-319-17765-6_4.
- [117] S. Bindel, S. Chaumette, and B. Hilt, “A novel predictive link quality metric for mobile ad-hoc networks in urban contexts,” in *International Conference on Ad Hoc Networks*, 2015, vol. 155, doi: 10.1007/978-3-319-25067-0_11.
- [118] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, and P. Levis, “Four-Bit Wireless Link Estimation,” 2007.
- [119] Y. Xu and W. C. Lee, “Exploring spatial correlation for link quality estimation in wireless sensor networks,” in *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM 2006)*, 2006, pp. 200–209, doi: 10.1109/PERCOM.2006.25.
- [120] R. Jain and I. Kashyap, “An QoS Aware Link Defined OLSR (LD-OLSR) Routing Protocol for MANETS,” *Wirel. Pers. Commun.*, pp. 1745–1758, 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06494-9.
- [121] M. K. Gulati and K. Kumar, “Stable Energy efficient QoS based Congestion and Delay aware Routing (SEQCDR) Protocol forMANETs,” in *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP 2015)*, 2015, pp. 505–511, doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322535.
- [122] G. Singal *et al.*, “Multi-constraints Link Stable Multicast Routing Protocol in MANETs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 63, pp. 115–128, 2017, doi: 10.1016/j.adhoc.2017.05.007.
- [123] A. M. Abdullah, E. Ozen, and H. Bayramoglu, “Investigating the impact of mobility models on MANET routing protocols,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 10, no. 2, pp. 25–35, 2019, doi: 10.14569/ijacsa.2019.0100204.
- [124] O. S. Gnana Prakasi and P. Varalakshmi, “Decision Tree Based Routing Protocol (DTRP) for Reliable Path in MANET,” *Wirel. Pers. Commun.*, pp. 257–270, 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06563-z.
- [125] L. Aziz, S. Raghay, and H. Aznaoui, “Enhancing multipath routing using an efficient multicriteria sorting technique,” *Int. J. Internet Technol. Secur. Trans.*, vol. 10, no. 6, pp. 675–693, 2020, doi: 10.1504/IJITST.2020.110575.
- [126] W. Sun, W. Lu, Q. Li, L. Chen, D. Mu, and X. Yuan, “WNN-LQE: Wavelet-Neural-Network-Based Link Quality Estimation for Smart Grid WSNs,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12788–12797, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2723360.
- [127] D. Tian and K. P. Choi, “Sharp bounds and normalization of Wiener-type indices,” *PLoS One*, vol. 8, no. 11, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0078448.
- [128] S. R. Afzal, S. Stuijk, M. Nabi, and T. Basten, “Effective link quality estimation as a means to improved end-to-end packet delivery in high traffic mobile ad hoc networks,” *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 150–163, 2017, doi: 10.1016/j.dcan.2016.12.001.
- [129] S. Hamad, S. Belhaj, and M. M. Muslam, “Average Link Stability with Energy-Aware routing protocol for MANETs,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 9, no. 1, pp. 554–562, 2018, doi: 10.14569/IJACSA.2018.090176.
- [130] “BonnMotion - A mobility scenario generation and analysis tool.” <http://sys.cs.uos.de/bonnmotion/> (accessed Nov. 19, 2020).