



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : **Sciences et Techniques**

Formation Doctorale : **Mathématiques et Physique Appliquée**

THÈSE

Présentée par

MOHAMED ER-ROUIDI

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : **Informatique**

Option : **Informatique**

Amélioration de la qualité de service et les protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad hoc

Soutenue le Mercredi 25 Décembre 2019 à 10h devant la commission d'examen :

B. BOUIKHALEN	Professeur à la Faculté Polydisciplinaire, Béni Mellal	Président
A. HAIR	Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal	Rapporteur
R. EL AYACHI	Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal	Rapporteur
N. GHERABI	Professeur à l'Ecole National des Sciences Appliquées, Khouribga	Rapporteur
M. BASLAM	Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal	Examineur
A. MERBOUHA	Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal	Directeur de Thèse
H. MOUNCIF	Professeur à la Faculté Polydisciplinaire, Béni Mellal	Co-Encadrant

RÉSUMÉ

Avec la popularité croissante des technologies sans fil, les réseaux mobiles ad hoc (MANET) sont devenus un domaine de recherche populaire. L'un des aspects les plus importants dans le processus de communication est la conception des protocoles de routage pour maintenir des routes d'une manière stable et efficace entre un nœud source et un nœud de destination, afin de permettre la communication entre ces deux nœuds. Comme les réseaux Ad hoc sont de nature dynamique, le processus de conception de ces protocoles est une tâche difficile.

Également, la plupart des appareils connectés dans un réseau Ad hoc fonctionnent avec une autonomie d'énergie limitée dont la durée de vie limitée de batterie impose une contrainte sévère sur les performances du réseau. Comme la gestion d'énergie est une importance primordiale pour prolonger la durée de vie et assurer la connectivité de réseau, elle doit d'être prise en compte dans la conception des algorithmes pour les réseaux mobiles Ad hoc.

Dans cette thèse des protocoles de routages ont été proposés pour améliorer la qualité de service et la stabilité des routes, en focalisant nos études sur la méthode de sélection des routes pour avoir un bon équilibre de charge entre les nœuds, et d'améliorer la gestion de l'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau. Les protocoles de routage suggérés ont été simulés à l'aide du simulateur de réseaux (NS2.35).

Mots clés : Réseaux mobiles ad hoc, économie d'énergie, logique floue, routage Ad hoc, qualité de service, Ad hoc On demand Distance Vector (AODV), simulateur (NS-2).

N°d' ordre : 242/2019

Amélioration de la qualité de service et les protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad hoc

MOHAMED ER-ROUIDI

Avant Propos

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire Mathématiques Appliquées et Calcul Scientifique (LMACS), à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, sous la direction de M. Abdelkarim MERBOUHA et M. Hicham MOUNCIF.

Je tiens en tout premier lieu à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Abdelkarim MERBOUHA, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, qui a dirigé cette thèse avec un intérêt constant, une grande disponibilité, et qui n'a ménagé aucun effort pour qu'elle aboutisse. Je le remercie vivement pour son suivi, sa direction de cette thèse, sa disponibilité, son soutien continu, et ses encouragements.

Je suis extrêmement reconnaissant à M. Hicham MOUNCIF, Professeur à la Faculté Poly-disciplinaire de Béni Mellal, qui a co-encadré ce travail, pour sa façon efficace avec laquelle il a suivi ce travail. Outre son questionnement constructif, la cohérence de ses suggestions, et la perspicacité de ses analyses, je souhaite aussi le remercier pour son soutien et ses encouragements permanents, ainsi que pour le climat de confiance et de convivialité dans lequel il m'a permis de travailler.

Je tiens à exprimer également mes sentiments les plus respectueux et ma profonde reconnaissance à mes chers parents, mon frère, mes sœurs et tous les membres de la famille pour les encouragements constants et soutien infaillibles qu'ils ont déployé tout au long de ces années de recherche.

Merci à tous les collègues des laboratoires LMACS et TIAD de la FST de Béni Mellal, pour leurs conseils, leurs encouragements, et pour la sympathie qu'ils m'ont témoignée.

Enfin, aucun mot ne peut exprimer ma reconnaissance à mon épouse Houda MOUDNI. Dans tout ce que j'ai pu souffrir et obtenir, elle a été l'autre moi. Je te remercie infiniment Houda.

Mohamed ER-ROUIDI.

Résumé

Résumé — Avec la popularité croissante des technologies sans fil, les réseaux mobiles ad hoc (MANET) sont devenus un domaine de recherche populaire. L'un des aspects les plus importants dans le processus de communication est la conception des protocoles de routage pour maintenir des routes d'une manière stable et efficace entre un nœud source et un nœud de destination, afin de permettre la communication entre ces deux nœuds. Comme les réseaux Ad hoc sont de nature dynamique, le processus de conception de ces protocoles est une tâche difficile.

Également, la plupart des appareils connectés dans un réseau Ad hoc fonctionnent avec une autonomie d'énergie limitée dont la durée de vie limitée de batterie impose une contrainte sévère sur les performances du réseau. Comme la gestion d'énergie est une importance primordiale pour prolonger la durée de vie et assurer la connectivité de réseau, elle doit être prise en compte dans la conception des algorithmes pour les réseaux mobiles Ad hoc.

Dans cette thèse les protocoles de routages ont été proposés pour améliorer la qualité de service et la stabilité des routes, en focalisant nos études sur la méthode de sélection des routes pour avoir un bon équilibrage de charge entre les nœuds, et d'améliorer la gestion de l'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau. Les protocoles de routage suggérés ont été simulés à l'aide du simulateur de réseaux (NS2.35).

Mots clés : Réseaux mobiles ad hoc, économie d'énergie, logique floue, routage Ad hoc, qualité de service , Ad hoc On demand Distance Vector (AODV), simulateur (NS-2).

Abstract

Abstract — With the growing popularity of wireless technologies, Mobile Ad hoc Networks (MANETs) have become a popular area of research. One of the most important aspects in the communication process is the design of routing protocols to maintain stable and efficient routes between a source node and a destination node, to allow communication between these nodes. As Ad hoc networks are dynamic in nature, the process of designing these protocols is a challenging task.

Also, most devices connected in an Ad hoc network operate with limited battery power which imposes a severe constraint on network performance. The conservation of energy and the effective energy management in this type of network is primordial and essential to extend the lifetime and ensure network connectivity. Thus, the energy parameter is one of the main constraints that must be respected in the design of algorithms for mobile networks Ad hoc.

In this thesis, routing protocols have been proposed to improve the quality of service and the stability of routes by focusing our studies on the route selection procedure to have a good load balancing between the nodes and to improve the management of energy to extend network lifetime. The suggested routing protocols were simulated using the Network Simulator 2 (NS2.35).

Keywords : Mobile Ad hoc NeETworks (MANETs), Energy, Fuzzy logic, Routing, Quality of Service (QoS), Ad hoc On demand Distance Vector (AODV), Network Simulator (NS-2).

Table des matières

Table des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Table des sigles et acronymes	xiii
Introduction générale	1
1 Réseau Mobile AD HOC	5
1.1 Introduction	5
1.2 Domaines d'application	7
1.3 Contraintes et problèmes de conception des MANETs	10
1.4 Classification des protocoles de routage	12
1.4.1 Selon la structure de réseau	12
1.4.1.1 Protocoles de routage plat	13
1.4.1.2 Protocoles de routage hiérarchiques	13
1.4.2 Selon la stratégie de routage	14
1.4.2.1 Protocoles proactifs	14
1.4.2.2 Protocoles réactifs	15
1.4.2.3 Protocoles hybrides	15
1.5 Quelques protocoles de routage ad hoc	16
1.5.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)	16
1.5.2 Optimized Link State Routing (OLSR)	17

1.5.3	Dynamic Source Routing (DSR)	21
1.6	Conclusion	24
2	Etat de l'art sur la qualité de service et l'énergie dans les réseaux MANETs	25
2.1	Introduction	25
2.2	Etat de l'art sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc . . .	27
2.2.1	Qualité de Service	27
2.2.2	Métriques de la qualité de service	28
2.2.3	Difficultés rencontrées par QoS dans les MANETs	30
2.2.4	Solutions de qualité de service dans les réseaux mobile ad hoc . . .	30
2.2.5	Solutions au niveau Modèles de qualité de service	31
2.2.5.1	IntServ	31
2.2.5.2	DiffServ	31
2.2.5.3	Modèles spécifiques aux réseaux ad hoc	32
2.2.6	Solutions au niveau de la couche MAC	33
2.2.6.1	Différenciation de services pour 802.11	33
2.2.6.2	Différenciation de service basée sur la fonction DCF	34
2.2.6.3	IEEE 802.11e	35
2.2.7	Solution au niveau protocoles de signalisation	35
2.2.7.1	INSIGNIA	35
2.2.8	Solution au niveau Routage	36
2.3	Etat de l'art sur l'énergie dans les MANETs	38
2.3.1	Modèle de consommation d'énergie	38

2.3.2	Facteurs de surconsommation d'énergie	40
2.3.2.1	Retransmission	40
2.3.2.2	Ecoute passive	41
2.3.2.3	Ecoute abusive	41
2.3.2.4	Surcharge	41
2.3.2.5	Taille des paquets	41
2.3.3	Conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc	42
2.3.3.1	Contrôle de la puissance de transmission	42
2.3.3.2	Conservation d'énergie au niveau routage	43
2.3.3.3	Gestion d'énergie	46
2.4	Conclusion	48
3	Comparaison entre les protocoles de routage en termes d'énergie	49
3.1	Introduction	49
3.2	Méthodologie	50
3.3	Indicateurs de mesure des performances réseaux	52
3.3.1	Charge des parquets de contrôle (NRL)	52
3.3.2	Taux de livraison des paquets avec succès (PDR)	52
3.3.3	Energie consommée	52
3.3.4	Délai moyen de bout en bout (Avg-End-to-End delay)	53
3.4	Model de consommation d'énergie	53
3.5	Paramètres de simulation	54
3.6	Résultats	55
3.7	Conclusion	65

4	Optimisation de l'énergie consommée par le protocole de routage AODV dans MANET	66
4.1	Introduction	66
4.2	Ad hoc On demand Distance Vector (AODV)	67
4.2.1	Procédure de découverte de route	72
4.2.2	Procédure de Maintenance des routes	74
4.3	EQ-AODV : energy and QoS supported AODV	75
4.4	Présentation générale de protocole amélioré EE-AODV	76
4.4.1	Sélection de la route	80
4.4.2	Simulation	82
4.5	Conclusion	87
5	Maximisation et amélioration de la durée de vie de protocole AODV en utilisant la logique floue	88
5.1	Introduction	88
5.2	La logique floue	89
5.2.1	Définition	90
5.2.2	Fonction d'appartenance	92
5.2.3	Opérateurs	93
5.2.4	Fuzzification	94
5.2.5	Raisonnement en logique floue	95
5.2.6	Défuzzification	96
5.2.7	Système logique floue	96
5.3	Fuzzy AODV	97
5.4	Simulation et résultats	106

5.5	Conclusion	110
	Conclusion générale et perspectives	111
	A Environnement de simulations network simulator 2	113
A	Présentation de Network Simulator 2	113
1	Architecture de NS-2	113
B	Notions de base sur le simulateur	115
1	Planificateur d'événements	115
2	Nœud de base	116
3	Paquet	116
4	Agent	118
	Bibliographie	127
	B Liste des Publications	128

Table des figures

1.1	Représentation d'un réseau mobile Ad-hoc	6
1.2	Extension du service Internet à un domaine non infrastructurel	7
1.3	Routage plat	13
1.4	Routage hiérarchique	14
1.5	Classification de protocole de routage dans les réseaux mobile Ad-hoc . . .	14
1.6	Réseau ad-hoc utilise le protocole DSDV	17
1.7	Relai Multipoint	19
1.8	Envois de message HELLO	20
1.9	Emission d'un paquet dans le cas du routage par la source	22
1.10	Exemple de maintenance de route (DSR)	24
3.1	Scenario avec 15 noeuds et sans mobilité	56
3.2	Scenario avec 15 noeuds et avec mobilité	56
3.3	Scenario avec 30 noeuds et sans mobilité	57
3.4	Scenario avec 30 noeuds et avec mobilité	57
3.5	Consommation d'énergie par rapport à la densité du réseau	58
3.6	Consommation d'énergie par rapport au nombre de connexions	59
3.7	Energie moyenne consommée par rapport au taux d'envoi	60
3.8	Consommation d'énergie par rapport la vitesse des nœuds (a)	61
3.9	Taux de paquets délivrés par rapport la vitesse des nœuds (b)	61
3.10	Taux de paquet de contrôle	62

3.11	Taux de paquet délivré	63
3.12	Energie consommée	63
3.13	Taux de paquets supprimés	64
4.1	Format du message RREQ	69
4.2	Format du message RREP	70
4.3	Format du message RERR	71
4.4	Format de message RREP-ACK	71
4.5	La propagatin du paquet RREQ	72
4.6	Chemin pris par RREP	73
4.7	Exemple de maintenance de route (AODV)	75
4.8	Représentation graphique de la fonction HE	76
4.9	Nouveau format de paquet RREQ	79
4.10	Taux de paquet de contrôle	83
4.11	Taux de paquet délivré	84
4.12	Energie consommé	85
4.13	Délai de bout-en-bout	85
4.14	Nombre de nœuds morts	86
5.1	Ensemble classique (à gauche) et ensemble flou (à droite)	91
5.2	Fonction d'appartenance de sous-ensemble "Délicieux"	92
5.3	Fonction d'appartenance des sous-ensembles "exécration" et "délicieux"	93
5.4	Variable linguistique "Qualité du service"	94
5.5	Variable linguistique "Qualité de la nourriture"	95
5.6	Format des règles floues	96

5.7	Méthode de défuzzification avec COG	96
5.8	Système logique floue	97
5.9	Système intégré dans l'approche proposée	98
5.10	Distance entre les nœuds	99
5.11	Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée "Energie"	103
5.12	Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée "Distance".	103
5.13	Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée "Mobilité".	104
5.14	Fonctions d'appartenance de la variable de sortie "Stabilité".	104
5.15	Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée nombre de sauts	104
5.16	Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée Stabilité	105
5.17	Fonctions d'appartenance de la variable de sortie Poids	106
5.18	Taux de paquets livré par rapport au nombre de connexions	108
5.19	Le taux de paquets de contrôle par rapport au nombre de connexions	108
5.20	Délai de bout en bout par rapport au nombre de connexions	109
5.21	la consommation d'énergie par rapport au nombre de connexions	110
A.1	Dualité des classes de NS2	114
A.2	Vue simplifiée de NS2	115
A.3	Structure du répertoire de NS2	115
A.4	Planificateur d'événements	116
A.5	Structure de base du nœud dans NS2	117
A.6	Lien simplex	117

Liste des tableaux

1.1	Table de routage de nœud numéro 2	18
2.1	Solutions de QoS dans les MANETs	31
2.2	Comparaison entre quelques protocoles de routage avec QOS	39
2.3	Energie consommée dans chaque mode	39
3.1	Paramètres d'énergie	54
3.2	Paramètres de simulation	55
4.1	Champs de paquet de demande de route	79
4.2	Paramètres de simulation.	82
5.1	Exemple des règles de conduite	90
5.2	Règles floues de FLS1	105
5.3	Règles floues de FLS2	106
5.4	Paramètres de simulation.	107

Table des sigles et acronymes

ACK	<i>ACKnowledge packet</i>
AODV	<i>Ad hoc On Demand Distance Vector routing protocol</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CBRP	<i>Cluster Based Routing Protocol</i>
CGSR	<i>Cluster-head Gateway Switch Routing</i>
CMMBCR	<i>Conditional Max-Min Battery Cost Routing</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Sanction</i>
DSDV	<i>Distance Source Distance Vector routing protocol</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing protocol</i>
FIS	<i>Fuzzy Inference System</i>
FQMM	<i>Flexible Quality of service Model for Manets</i>
GAF	<i>Geographical Adaptive Fdelity</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>International Engineering Task Force</i>
IMAQ	<i>Integrated Mobile Ad hoc Qos framework</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
MBCR	<i>Minimum Battery Cost Routing</i>
MMBCR	<i>Minimum Maximum Battery Cost Routing</i>
MPR	<i>Multi-Point Relays</i>
NS-2	<i>Network Simulator version 2</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i>
OTCL	<i>Oriented Tool Command Language</i>
PCM	<i>Power Control MAC</i>

PDR	<i>Packet Delivery Ratio QoS Quality of Service</i>
RERR	<i>Route ERRor</i>
RFC	<i>Request For Comment</i>
RREP	<i>Route REPlY</i>
RREQ	<i>Route REQuest</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
SWAN	<i>service differentiation in Stateless Wireless Ad Hoc Networks</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
TORA	<i>Temporally Ordered Routing Algorithm</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
VANET	<i>Vehicular Ad hoc NETwork</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
ZRP	<i>Zone Routing Protocol</i>

Introduction générale

1. Contexte Général

Durant ces dernières décennies, les progrès technologiques ont permis de réaliser ce qui était un rêve depuis longtemps, de nombreuses technologies de communication sans fil ont fait leur apparition et sont devenues indéniablement populaires dans la vie quotidienne. Ces technologies jouent un rôle de plus en plus fondamental dans nos vies au point qu'il est aujourd'hui impossible d'imaginer le monde sans les avantages qu'elles offrent. Grâce à leurs utilités et leur grande flexibilité, les réseaux sans fil sont également devenus plus accessibles au point de devenir incontournables partout.

Cette explosion de la technologie et son adoption remarquable par la société ont conduit les chercheurs, au cours des dernières années, à se concentrer sur un nouveau type de réseaux sans fil : les réseaux mobiles ad hoc.

L'Internet Engineering Task Force (IETF), l'organe chargé de guider l'évolution de l'Internet, fournit la définition donnée ci-dessous [1] :

Un réseau mobile ad hoc (MANET) est un système autonome de routeurs mobiles (et d'hôtes associés) reliés par des liaisons sans fil. Les routeurs sont libres de se déplacer au hasard et de s'organiser arbitrairement ; ainsi, la topologie sans fil du réseau peut changer rapidement et de façon imprévisible. Un tel réseau peut fonctionner de façon autonome ou être relié à l'Internet en général.

Dans ce mode de réseau, l'interconnexion entre les nœuds, est créée le plus souvent à la demande lorsque les appareils dotés de capacités de communication se rencontrent. Aussi il n'y a pas besoin d'un intervenant ou d'une infrastructure pour initier la communication.

Ces caractéristiques ont permis à ce type de réseau d'être rapide et facile à déployer, ce qui lui permet d'avoir plusieurs domaines d'application telles que les opérations de sauvetage, les opérations militaires, les explorations, les réseaux véhiculaires, les réseaux de capteur, etc.

Cependant, la particularité intrinsèque de ces réseaux, comme l'auto-organisation, l'hétérogénéité des appareils, le dynamisme ainsi que le comportement imprévisible ont des inconvénients internes qui les rendent difficiles à mettre en œuvre, comme par exemple le

changement de la topologie, l'utilisation des batteries, la portée limitée des transmissions, le partitionnement du réseau, etc.

2. Motivation

Dans les réseaux mobiles Ad hoc, chaque nœud mobile a la possibilité de router des paquets de données vers un nœud destinataire. En effet, Chaque nœud du réseau doit participer dans le processus d'acheminement des paquets à travers le réseau, jouant le rôle d'un routeur ainsi que d'un terminal en même temps. Pour cela un protocole de routage distribué est nécessaire.

Les protocoles de routage développés pour les réseaux filaires sont inadéquats, car ils supposent principalement les topologies fixes, et ils ont aussi un taux de paquet de contrôle plus élevés.

Le développement d'un protocole de routage est l'un des challenges les plus importants dans les réseaux Ad hoc , il est critique pour les opérations de base du réseau. Certaines combinaisons particulières de caractéristiques rendent le routage dans les réseaux ad hoc intéressant.

Premièrement, les nœuds d'un réseau ad hoc sont libres de se déplacer de manière incontrôlée, cette mobilité des nœuds se traduit par un réseau très dynamique avec des changements topologiques rapides qui provoquent de fréquentes défaillances de la route. Un bon protocole de routage pour cet environnement réseau doit s'adapter dynamiquement à l'évolution de la topologie du réseau.

Deuxièmement, le canal de transmission sans fil offre une bande passante plus faible et plus variable que les réseaux filaires. Le canal sans fil fonctionnant comme un support partagé rend la bande passante disponible par nœud encore plus faible. Donc les protocoles de routage devraient être efficaces en terme de bande passante en réduisant les charges de calcul des routes pour garder une grande partie de la bande passante disponible pour la communication réelle des données.

Troisièmement, les nœuds fonctionnent avec des batteries dont l'alimentation en énergie est limitée. Pour que les nœuds puissent rester actifs et communiquer plus longtemps, il est souhaitable qu'un protocole de routage soit également plus efficace sur le plan énergétique. C'est également une autre raison pour laquelle le taux de paquet de contrôle doit être maintenu à une valeur minimale. Ainsi, les protocoles de routage doivent répondre à des

objectifs contradictoires d'adaptation dynamique et de faible surcharge pour assurer une bonne performance globale.

Dans cette thèse, toutes nos contributions s'articulent autour de l'amélioration d'un protocole de routage appartenant aux protocoles réactifs qui est le protocole Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV). Ces améliorations sont faites afin de surmonter les problèmes engendrés par les contraintes des réseaux Ad hoc, ainsi que de gérer la consommation de l'énergie de manière efficace dans le réseau.

3. Contributions

Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes intéressés à l'amélioration d'un protocole de routage qui satisfait les besoins de qualité de service en termes de taux de paquets livrés, délai de bout-en-bout, le taux de paquet de contrôle, l'énergie consommée, etc. Ainsi de gérer la gestion d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau.

Premièrement et afin de valider le choix de la sélection d'AODV, nous avons comparé les performances de ce protocole avec les protocoles DSR, DSDV et OLSR en tenant compte de l'énergie consommée par chaque protocole et en analysant l'impact de l'énergie sur les différentes métriques de qualité de service.

Deuxièmement, nous avons proposé une stratégie de routage pour améliorer le protocole AODV prenant en considération deux paramètres essentiels : l'énergie et l'équilibrage de charge du trafic entre tous les nœuds du réseau.

Ensuite, nous avons proposé une amélioration de la première solution proposée tout en gardant les mêmes objectifs. Dans cette solution nous avons ajouté d'autres métriques comme l'état des nœuds en terme d'énergie, la distance entre deux nœuds communicants et la variation de la mobilité de ces nœuds afin de sélectionner une route qu'est plus stable parmi les routes disponibles..

4. Structure de la thèse

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre, donne un état de l'art sur les réseaux mobiles Ad Hoc. Ainsi il

présente les notions de base des réseaux ad hoc, les principales caractéristiques des MANET et les contraintes qui en résultent. Il décrit également les principaux protocoles proposés et leurs classifications. Enfin il présente une étude détaillée du protocole AODV.

Le deuxième chapitre présente une étude synthétique des travaux existants dans la littérature sur les protocoles de routage proposés pour améliorer la qualité de service dans les réseaux mobile Ad hoc.

Le troisième chapitre présente une étude comparative entre quatre protocoles de routage AODV, DSR, DSDV et OLSR. Dans ces comparaisons, nous nous concentrons sur la partie consommation d'énergie afin de sélectionner un protocole de routage en tant que protocole de base dans la conception de nos extensions.

Le quatrième chapitre, présente une amélioration de protocole AODV. dans ce protocole on a modifié le mécanisme de recherche de route d'une manière à prendre l'énergie résiduelle (ou la durée de vie restante) comme métrique de sélection de route. Afin d'équilibrer la charge de trafic sur les différents nœuds du réseau et prolonger sa durée de vie.

Le cinquième chapitre, présente la troisième contribution. Un protocole qui intègre dans son processus de recherche de routes les principaux paramètres responsables de la défaillance des routes : la durée de vie restante des nœuds, la distance entre les nœuds et la variation de mobilité des nœuds. Le protocole combine ces paramètres et en utilisant la logique floue, il sélectionne la route la plus stable parmi les routes disponibles.

Nous terminons ce rapport par une conclusion qui présente également quelques perspectives possibles pour ces travaux.

Réseau Mobile AD HOC

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Domaines d'application	7
1.3	Contraintes et problèmes de conception des MANETs	10
1.4	Classification des protocoles de routage	12
1.4.1	Selon la structure de réseau	12
1.4.2	Selon la stratégie de routage	14
1.5	Quelques protocoles de routage ad hoc	16
1.5.1	Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)	16
1.5.2	Optimized Link State Routing (OLSR)	17
1.5.3	Dynamic Source Routing (DSR)	21
1.6	Conclusion	24

1.1 Introduction

Le premier réseau de communication sans fil entre ordinateurs a été créé en 1971 par Norman Abramson à l'Université d'Hawaii, l'AlohaNet [2]. Il était composé de 7 ordinateurs répartis sur quatre îles qui pouvaient communiquer avec un nœud central dans l'île d'Oahu en utilisant la communication radio. De plus, le protocole d'accès aléatoire le plus connu, ALOHA, a également été développé et présenté à cette époque [3]. Le canal ALOHA est aujourd'hui utilisé dans tous les grands réseaux mobiles (2 et 3G), ainsi que dans presque tous les réseaux de données bidirectionnels par satellite [4].

Grâce à la réduction du coût et de la taille du matériel nécessaire, la technologie sans fil s'étend largement dans notre vie quotidienne. L'énorme quantité d'appareils qui fournissent

la technologie sans fil de nos jours, ainsi que le nombre croissant de personnes qui les utilisent, font du domaine de la technologie sans fil un sujet clé dans la recherche.

Les réseaux sans fil mobiles actuels sont constitués de nœuds sans fil connectés à une station de base centrale. Lorsqu'un périphérique se déplace vers une zone géographique différente, il doit se connecter à une autre station de base afin de poursuivre le service. Cela signifie que deux nœuds situés dans la même région ne peuvent pas communiquer à moins qu'une station de base ne soit associée à cette zone. Les chercheurs ont envisagé la possibilité de communiquer des dispositifs lorsque l'infrastructure fixe n'était pas disponible, c'est-à-dire dans des zones éloignées ou sinistrées. Ce type de réseaux est appelé réseaux ad hoc (figure 1.1) .

Dans un réseau ad hoc, tous les nœuds peuvent également servir de routeurs de paquets pour permettre la communication entre les nœuds qui ne sont pas à portée. On dit que deux nœuds sont à portée lorsqu'ils sont capables de recevoir et de décoder correctement les paquets envoyés par un autre nœud.

Dans un réseau ad hoc, les périphériques proches se communiquent directement (en réglant leurs interfaces réseau sans fil en mode ad hoc) non seulement pour échanger leurs données, mais aussi pour relayer le trafic des autres nœuds du réseau qui ne peuvent pas communiquer directement.

Pour cette raison, dans un MANET, les dispositifs sans fil doivent fournir de manière coopérative la fonctionnalité qui est habituellement fournie par l'infrastructure du réseau (par exemple, routeurs, commutateurs, serveurs).

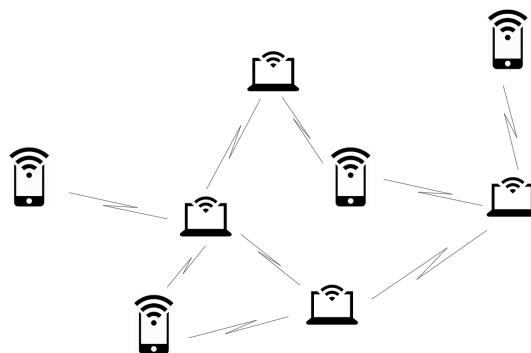


FIGURE 1.1: Représentation d'un réseau mobile Ad-hoc

En outre, un réseau ad hoc mobile ne fonctionne pas seulement en mode isolé, mais il peut également être connecté à un scénario de réseau plus vaste, comme celui illustré dans

la figure 1.2 [5].

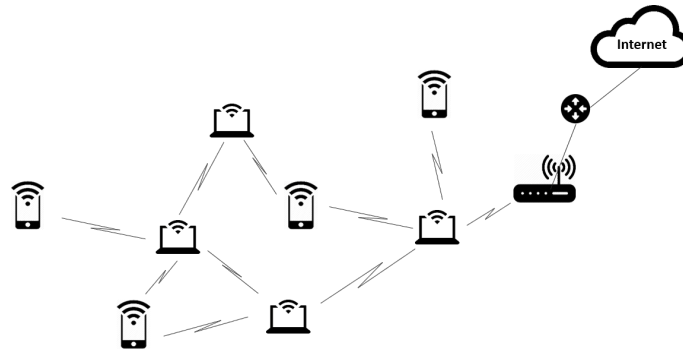


FIGURE 1.2: Extension du service Internet à un domaine non infrastructurel

Avec l'apparition des architectures réseaux plus récentes, de nouveaux scénarios apparaissent comme des applications des MANET tels que les Smart Cities et IoT (Internet of Things). En ce sens, les réseaux mobiles ad hoc deviennent une partie intégrante des réseaux 4G en raison de leur flexibilité, de leur capacité d'auto-configuration, de leur non exigence d'infrastructure, de leur facilité de maintenance, de leurs capacités d'auto administration et de leur rentabilité. Ce chapitre présente les réseaux mobiles Adhoc avec les domaines d'application, ensuite une classification de protocole de routage sera présentée. Et à la fin nous détaillons quelques protocoles de routage.

1.2 Domaines d'application

Les réseaux mobiles ad hoc ont été conçus pour un réseau polyvalent, en termes de déploiement dans le monde réel et d'adoption industrielle, Les applications MANET sont envisagées comme des réseaux spécialisés gérés par une autorité unique et conçus pour résoudre des problèmes spécifiques. Par exemple dans les réseaux militaires, les réseaux de véhicules ou les réseaux de capteurs. En outre, les MANET attendu de devenir un élément clé de l'architecture 4G. De même, la technique de mise en réseau ad hoc devrait devenir une importante technologie des réseaux sans fil de la prochaine génération.

Dans ce contexte, les applications typiques et certains cas d'utilisation les plus illustratifs sont décrits ci-dessous :

- **Réseaux de tactiques(militaires)**

Les MANET sont appropriés pour soutenir les besoins de communication et de coordination

entre les soldats et les véhicules militaires. Les avantages qu'offrent les MANET dans les applications militaires sont multiples. Tout d'abord, leur architecture distribuée diminue le risque d'échec de la communication car il n'existe pas d'infrastructure fixe pouvant être attaquée. Deuxièmement, les réseaux tactiques basés sur les MANET peuvent être rapidement déployés même dans les zones où aucune infrastructure n'est disponible.

- **Étendre la connexion réseau**

Les MANET peuvent également être utilisés pour assurer la communication entre appareils ou avec Internet dans des zones avec infrastructure limitée ou un accès intermittent. Deux exemples sont l'Internet Interplanétaire et le système Internet Rural. Le premier, est un système de communication multi-saut entre des appareils tels que des satellites et des navettes dans le but de fournir une solution aux distances extrêmes lorsqu'une communication à simple saut est utilisée. L'Internet rural est un système de réseautage qui étend la connectivité Internet aux régions éloignées grâce à des appareils électroniques, à la fois personnels (par exemple, téléphones mobiles) et/ou appartenant à la communauté. Quelques exemples de cette application : le système Kiosknet [6] et le Saami Network Connectivity en Suède [7].

- **Réseaux d'urgence**

Les réseaux ad hoc ont traditionnellement été utilisés dans des situations de catastrophe, telles que les inondations, les tremblements de terre ou les incendies. Les réseaux ad hoc permettent non seulement la communication entre les équipes d'urgence, mais aussi le déploiement rapide des moyennes tels que des drones ou des robots autonomes, afin de minimiser le temps de réponse et de maximiser l'efficacité des ressources disponibles.

- **Réseaux véhiculaires (VANETs)**

Les nouveaux systèmes de transport intelligents impliquent un cas particulier de réseaux ad hoc connus sous le nom de réseaux véhiculaires (VANET). Dans ces réseaux, les véhicules sont équipés d'interfaces sans fil leur permettant de communiquer entre eux (V2V) ou avec l'infrastructure fixe côté route (V2I).

D'une part, les communications V2V permettent aux véhicules de participer à la coordination des véhicules ainsi qu'à l'acheminement des autres communications. Et d'autre part, la connectivité V2I permet aux véhicules d'obtenir des informations sur les conditions routières, les embouteillages ou les alertes d'accidents, et les plateformes de contrôle peuvent mettre à jour les feux en temps réel afin d'optimiser le trafic en cas de congestion. En fait, IEEE travaille dans la famille des normes IEEE 1609 [8] pour définir une architecture et un ensemble de services et d'interfaces complémentaires et standardisés qui permettent collectivement des communications sans fil sécurisées V2V et V2I.

- **Réseaux personnels sans fil (PAN)**

Ce type de réseaux ad hoc permet aux dispositifs électroniques proximaux ayant des objectifs spécifiques, tels que des caméras, des dispositifs de stockage, des téléviseurs, des téléphones portables ou des ordinateurs portables, de partager dynamiquement des informations via un réseau domestique autonome.

- **Réseaux de surface corporelle**

Dans certaines situations, il n'est pas pratique d'emporter et de tenir un ordinateur, par exemple dans une chaîne de montage ou en hauteur. Dans ces cas, un ordinateur portable peut fournir une solution pour l'informatique omniprésente en distribuant des composants informatiques (par exemple des processeurs, des mémoires de masse, des écrans, des écouteurs et des microphones) sur le corps [9], [10]. De même, un système de capteurs médicaux sans fil peut être situé dans ou autour d'un corps humain fonctionnant comme un système de surveillance de la santé, pouvant être utilisé dans un large éventail d'applications [11], comme la surveillance à distance, la réhabilitation et la prévention des maladies, ou pour l'entraînement sportif. Quelques exemples de réseaux de surface corporelle formés par des capteurs médicaux utilisés dans les systèmes de télémédecine peuvent être trouvés dans [12], [13].

- **Réseaux de capteurs sans fil (WSN)**

MANETS peut également être utilisé pour interconnecter un ensemble de capteurs à faible coût et de faible puissance déployés dans l'environnement ou alternativement transportés par des animaux. Ces capteurs sont généralement intégrés, par exemple, dans les bâtiments, les ponts, les rues, les animaux ou les montagnes et ils sont utilisés pour la surveillance environnementale ou industrielle et, plus généralement, pour surveiller des événements et des phénomènes.

- **Villes intelligentes**

Le modèle récemment proposé d'une gestion intelligente des ressources disponibles dans une ville, connu sous le nom de "Smart Cities", émerge comme une autre application de la mise en réseau ad hoc sans fil [14]. Smart Cities propose l'utilisation d'un système de communication sans fil pour interconnecter les dispositifs intelligents déployés dans la ville et faciliter la diffusion du contenu entre les utilisateurs. De nouveaux services et applications peuvent être fournis par des capteurs et des actionneurs sans fil pour le contrôle et la coordination des services physiques (tels que l'éclairage adaptatif, la gestion des déchets et la signalisation intelligente) [15] - [16] ainsi que pour apprendre les comportements et les besoins des citoyens et adapter les services de la ville.

- **Internet des objets (IoT)**

Internet des objets est un nouveau paradigme de communication qui décrit un nouveau

scénario de la communication sans fil moderne où tous les dispositifs communiquent via une plate-forme commune et peuvent donc être facilement contrôlés à distance [14]. L'objectif principal est de construire une plate-forme virtuelle où les objets (tels qu'un réseau de capteurs, un véhicule, un appareil, des téléphones portables, etc.) peuvent interagir entre eux et peuvent librement participer et offrir/recevoir tout type de service.

1.3 Contraintes et problèmes de conception des MANETS

Bien qu'un réseau ad hoc sans fil présente de nombreux avantages, tels que la souplesse, l'auto-organisation, l'auto-administrasson, la facilité de déploiement, etc. Mais ces avantages ont un prix. Les réseaux mobiles ad hoc sans fil rencontrent les problèmes classiques des communications sans fil, tels que la limitation de la bande passante, les contraintes d'énergie et une qualité de service limitée. En outre, la mobilité des nœuds de réseaux, la nature de multi-saut et le manque d'infrastructure fixe créent un certain nombre de difficultés et de contraintes de conception qui sont nouvelles pour les réseaux mobiles ad hoc, comme décrit ci-dessous :

- **Absence d'infrastructure**

Le manque d'infrastructure fixe des réseaux mobiles ad hoc génère de nouveaux problèmes de conception par rapport aux réseaux fixes. De plus, l'absence d'une administration centralisée signifie que la gestion du réseau doit être répartie entre les différents nœuds, ce qui complique encore plus la détection et la gestion des défaillances.

- **Réseau de topologie dynamique**

Dans les réseaux ad hoc mobiles, la topologie du réseau peut changer fréquemment et de façon imprévisible, car les nœuds peuvent se déplacer de manière arbitraire. De ce fait provoque des changements de route, des échecs fréquents de connectivité et des pertes de paquets. La topologie du réseau dans un réseau ad hoc sans fil est hautement dynamique en raison de la mobilité des nœuds. Étant donné que les nœuds peuvent se déplacer à l'intérieur et extérieur de la couverture les uns des autres, la topologie peut changer rapidement et de façon imprévisible, et la connectivité entre les périphériques peut varier avec le temps.

- **Ressource limitée**

Généralement, les nœuds mobiles dans un MANET, tels que les smartphones, les capteurs ou les dispositifs portables, ont une capacité de traitement qu'est faible ou modérée, une

taille de mémoire et une puissance limitée. Cette contrainte de ressources provoque une faible performance avec un stockage limité. Même si de nouveaux appareils mobiles apparaissent de nos jours plus puissants et efficaces, mais l'efficacité énergétique semble toujours insuffisante car les fonctions de calcul et les services de routage deviennent plus complexes. Dans ce contexte, les capacités de transmission et les applications pouvant, être prises en charge par chaque nœud mobile, sont également réduites.

- **Qualité et capacité de liaison limitées**

Parce que le support physique sans fil est partagé entre les nœuds, seul un nœud émetteur peut utiliser ce canal sans fil. Ce fait conduit à une faible efficacité dans l'utilisation de la bande passante et à une capacité variable des liaisons due à des interférences mutuelles.

- **Connectivité réseau**

La connectivité réseau dans les MANET est obtenue par le routage et le transfert des paquets de contrôle entre plusieurs nœuds. Ceci introduit deux problèmes principaux. Premièrement, le processus de découverte de route est pris en charge par des nœuds à ressources limitées, qui doivent exécuter un protocole de routage pour trouver des itinéraires appropriés. Deuxièmement, lorsqu'un nœud ne parvient pas à trouver une route ou à transmettre un paquet, le manque de surveillance centralisée et une entité de gestion conduisant à des mauvais comportements car ces types de problèmes ne peuvent pas être détectés rapidement, ajoutant une complexité substantielle à la conception du protocole.

- **Qualité de service**

Un certain niveau de qualité de service (QoS) est essentiel pour une livraison réussie du contenu. Atteindre certaines exigences de QoS (débit, délai, perte de paquets, gigue, taux d'erreur) est très difficile dans les MANET en raison des caractéristiques et des contraintes du réseau décrites ci-dessus, telles que la topologie réseau dynamique, la capacité de liaison limitée et les capacités des nœuds.

- **Sécurité de réseaux**

Les réseaux mobiles sans fil sont généralement plus vulnérables aux menaces liées à l'information et à la sécurité physique que les réseaux filaires. L'utilisation de support sans fil ouverts et partagés rend les nœuds d'un réseau ad hoc mobile plus vulnérables aux menaces de sécurité. De plus, sans infrastructure centralisée, le contrôle de sécurité doit être distribué dans chaque nœud, ce qui est plus difficile à mettre en œuvre.

1.4 Classification des protocoles de routage

Un protocole de routage spécifie comment les routeurs communiquent les uns avec les autres, en distribuant des informations qui leur permettent de sélectionner des routes entre deux nœuds sur un réseau informatique. Les algorithmes de routage déterminent le choix spécifique de la route. Chaque routeur n'a une connaissance préalable que sur les réseaux qui lui sont directement rattachés et partage cette information d'abord entre les voisins immédiats, puis à travers le réseau. De cette façon, les routeurs acquièrent des connaissances sur la topologie du réseau pour transférer les données.

Il y a plusieurs protocoles de routage proposés pour les réseaux car une seule solution ne peut pas forcément être valide dans toutes les situations ; c'est pourquoi plusieurs algorithmes et protocoles sont utilisés dans des cadres différents. Comme le routage est un élément essentiel dans le fonctionnement d'un réseau, il est nécessaire pour un algorithme de routage d'être solide et de ne pas causer d'effondrement du réseau à cause d'erreurs. Pour cela différents critères d'évaluation existent pour tester la robustesse des algorithmes de routage : l'exactitude des routes obtenues est essentielle, la stabilité des routes, le débit, le temps d'acheminement de la source à la destination, le temps de découverte d'une route et encore l'impact des messages du protocole de routage sur les performances du réseau sont autant de critères à prendre en compte lors de la construction de la route.

Les protocoles de routage classiques pour les réseaux mobiles ad hoc ont été conçus pour trouver un chemin, entre deux nœuds communicants, sans tenir compte de sa qualité. Ces protocoles découvrent et maintiennent généralement les routes en fonction du nombre de sauts entre la source et la destination.

Les protocoles de routage pour les réseaux mobiles ad hoc peuvent être classés selon différents critères. Mais la plupart d'entre elles sont classés en fonction de la stratégie de routage et de la structure du réseau [17],[18].

1.4.1 Selon la structure de réseau

Les protocoles de routage peuvent être catégorisés Selon la structure de réseau en routage à plat, en routage hiérarchique et en routage assisté par position géographique, et etc. Cette classification concerne le type de vision qu'ils ont du réseau et les différentes fonctions qu'ils attribuent aux différents nœuds mobiles.

1.4.1.1 Protocoles de routage plat

Les protocoles de routage plat sont des protocoles dans lesquels les nœuds sont égaux et ont le même rôle (figure 1.3). L'acheminement des paquets de la part d'un nœud dépend de sa position dans le réseau. Ils peuvent être classés selon les données qu'ils utilisent pour créer les routes [19] en protocoles orientés topologie et protocoles orientés destinations.

Dans la première catégorie, chaque nœud utilise comme données l'état de ses connexions avec ses voisins, cette information est ensuite transmise aux autres nœuds pour leur donner une connaissance plus précise de la topologie du réseau. Pour les protocoles orientés destinations ils maintiennent pour chaque nœud destination une information sur le nombre de nœuds intermédiaires qui les en séparent (nombre de sauts) et le premier nœud voisin à emprunter pour y arriver.

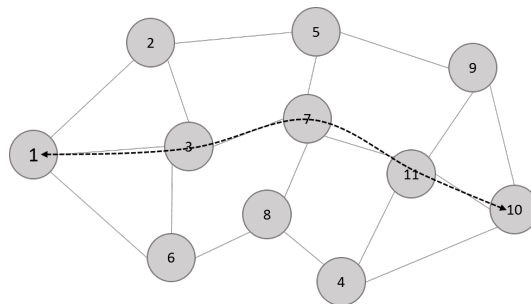


FIGURE 1.3: Routage plat

1.4.1.2 Protocoles de routage hiérarchiques

Dans le cas où la taille du réseau sans fil devient grosse, les protocoles de routage à plat peuvent produire trop de trafic dans le réseau. Dans ce cas, une solution hiérarchique peut être préférable. Les protocoles hiérarchiques permettent de partitionner le réseau en sous-groupe pour faciliter la gestion du réseau et préserver les ressources de réseau. Ainsi ils permettent d'organiser le réseau de telle sorte que chaque sous-groupes de nœuds ait un super nœud appelé cluster-head. Ce dernier gère cet ensemble de nœuds et communique avec d'autres cluster-heads. Par exemple, un mobile pourra servir de passerelle pour un certain nombre de nœuds qui sont reliés à lui. Un exemple est donné sur la figure 1.4 , où le nœud N3 passe par les passerelles P1, P2 et P3 pour atteindre N7 [20].

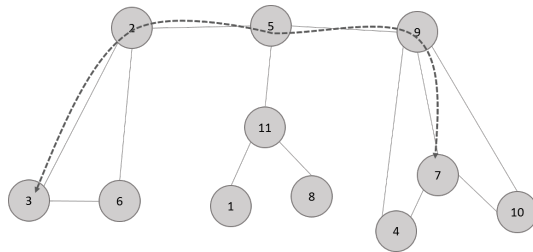


FIGURE 1.4: Routage hiérarchique

On distingue deux modes de fonctionnement dans les protocoles hiérarchiques [19]. Protocoles à sélection de voisins, dans ce mode chaque nœud sous-traite la fonction de routage à un sous-ensemble de ses voisins directs tel que Hierarchical OLSR [21]. Et le deuxième mode les protocoles à partitionnement, dans lequel le réseau est découpé en zones et le routage est assuré par un unique nœud maître tel que Cluster-head Gateway Switch Routing (CGSR) [22].

1.4.2 Selon la stratégie de routage

Les protocoles de routage peuvent être catégorisés selon la stratégie de routage comme les protocoles proactifs, réactives ou hybrides. Figure 1.5 présente la classification de quelques protocoles de routage.

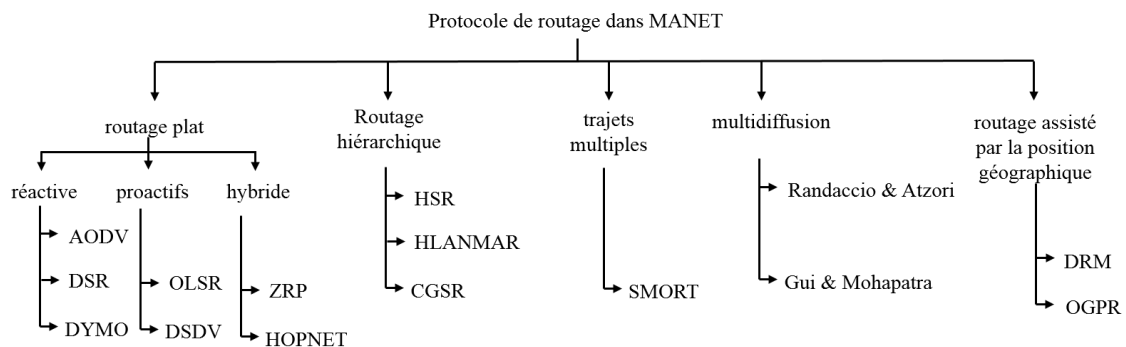


FIGURE 1.5: Classification de protocole de routage dans les réseaux mobile Ad-hoc

1.4.2.1 Protocoles proactifs

Dans le routage proactif, chaque nœud du réseau maintient une ou plusieurs tables contenant les informations de routage vers chaque autre nœud du réseau. Tous les nœuds

mettent leurs tables à jour périodiquement de façon à maintenir une vue solide et réelle du réseau [23]. Lorsque la topologie du réseau change, les nœuds propagent des messages de contrôle à travers le réseau afin de conserver cette consistance et de garder à jour l'information de routage pour l'ensemble du réseau. Ces protocoles diffèrent sur la manière par laquelle des changements de topologies sont distribués à travers le réseau et sur le nombre de tables réservées au routage. Parmi les avantages de ce type de protocole est d'avoir les routes immédiatement disponibles quand les nœuds de réseau en ont besoin, mais cela se fait au coût d'échanges réguliers de messages comme la consommation de bande passante et l'énergie, qui ne sont certainement pas tous nécessaires ainsi seules certaines routes seront utilisées par les applications en général. Il existe plusieurs protocoles connus de cette catégorie, à titre d'exemples, nous pouvons citer DSDV, GSR, FSR, HSR et ZHLS.

1.4.2.2 Protocoles réactifs

Dans ce type de protocoles de routage dit routage à la demande, les routes ne sont pas maintenues vers tous les nœuds mais elles sont créées selon les demandes des applications. Cela permet d'économiser de la bande passante et de l'énergie par rapport au protocole proactive. Lorsqu'un paquet de données doit être envoyé, le protocole de routage va chercher un chemin jusqu'à la destination. Une fois la route établie, il est enregistré dans la table de routage et peut être utilisé. En général, les protocoles réactifs cherchent la route par l'inondation du paquet de contrôle de proche en proche dans tout ou dans une partie du réseau. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle ne génère du trafic de contrôle que lorsqu'il est nécessaire. Les principales contreparties sont que l'inondation est un mécanisme coûteux qui va faire intervenir tous les nœuds du réseau en très peu de temps et qu'il va y avoir un délai à l'établissement des routes, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives. A titre d'exemples, les protocoles appartenant à ce type sont DSR, AODV et TORA.

1.4.2.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent les techniques des protocoles proactifs, pour découvrir le voisinage proche (par exemple voisinage à deux sauts ou à trois sauts) ; ainsi ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de cette zone prédéfinie, le protocole hybride fait appel aux techniques des protocoles réactifs pour chercher des routes. Avec ce découpage, le réseau est partagé en plusieurs zones, et la recherche de route en mode réactif peut être améliorée.

À la réception d'une requête de recherche réactive, un nœud peut indiquer immédiatement si la destination est dans le voisinage ou non, et par conséquent savoir s'il faut orienter la requête vers les autres zones sans déranger le reste de sa zone. Ce type de protocole s'adapte bien aux grands réseaux, cependant, il cumule aussi les inconvénients des protocoles réactifs et proactifs : messages de contrôle périodiques plus le coût d'initialisation d'une nouvelle route. Zone Routing Protocol (ZRP [24]) et Cluster Based Routing Protocol (CBRP [25]) sont des exemples de tels protocoles.

Des protocoles de routage ont été proposés par le groupe de travail MANET de l'IETF, pour prendre en compte les spécificités des réseaux MANET. Ces protocoles représentent diverses techniques et sont sur la voie d'une normalisation. AODV, DSR, DSDV et OLSR font désormais l'objet d'une Request For Comment (RFC) tandis que les autres en sont à des versions assez stabilisées de leur drafts. Dans la suite de cette section, les principaux protocoles MANET seront donc présentés.

1.5 Quelques protocoles de routage ad hoc

1.5.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

DSDV [26] est un protocole de routage appartenant aux protocoles proactifs pour les réseaux mobiles ad hoc, inspiré de protocole RIP (Routing Information Protocol) basé sur l'algorithme de Bellman-Ford. Il a été développé par C. Perkins et P. Bhagwat en 1994. La contribution principale de l'algorithme était de résoudre le problème de la boucle de routage.

Dans le DSDV, chaque nœud mobile dans le réseau ad hoc maintient une table de routage qui répertorie toutes les destinations disponibles du réseau. La structure de la table de routage pour ce protocole est simple. Chaque entrée de table a un numéro de séquence incrémenté chaque fois qu'un nœud envoie un message mis à jour. Les tables de routage sont régulièrement mises à jour lorsque la topologie du réseau change et sont propagées sur le réseau pour conserver des informations cohérentes sur l'ensemble du réseau.

Chaque nœud DSDV maintient deux tables de routage : une pour le transfert des paquets et une pour la diffusion des paquets de routage incrémentiels. Les informations de routage envoyées périodiquement par un nœud contiennent un nouveau numéro de séquence, l'adresse de destination, le nombre de sauts vers le nœud de destination et le

numéro de séquence de la destination. Lorsque la topologie d'un réseau change, un nœud de détecteur envoie un paquet de mise à jour à ses nœuds voisins. A la réception d'un paquet de mise à jour provenant d'un nœud voisin, un nœud récupère l'information du paquet et met à jour sa table de routage comme suit :

- Si la nouvelle adresse a un numéro de séquence supérieur, le nœud sélectionne l'itinéraire avec le numéro de séquence supérieur et supprime l'ancien numéro de séquence.
- Si le numéro de séquence entrant est identique à celui de la route existante, on choisit la route la plus avantageuse.
- Toutes les métriques choisies parmi les nouvelles informations de routage sont incrémentées.
- Ce processus se répète jusqu'à ce que tous les nœuds soient mis à jour. S'il y a des paquets dupliqués de mis à jour, le nœud considère de garder celui qui a la métrique la plus avantageuse et de d'ignorer le reste.

En cas de rupture de lien, un coût de métrique INF (infinie) avec un nouveau numéro de séquence (incrémenté) lui est attribué pour éviter les boucles de routages et d'offrir des informations explicites en cas d'inaccessibilité d'un lien.

Table 1.1 montre la table de routage du nœud 2 (figure 1.6), dont les voisins sont les nœuds 1, 3, 4 et 8. Les lignes en pointillés indiquent qu'il n'y a pas de communication entre les deux nœuds correspondants. Par conséquent, le nœud 2 n'a pas d'informations sur le nœud 8.

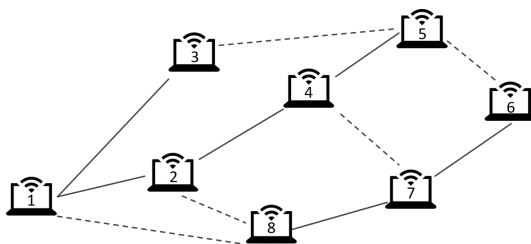


FIGURE 1.6: Réseau ad-hoc utilise le protocole DSDV

1.5.2 Optimized Link State Routing (OLSR)

OLSR [27] est un protocole de routage proactif formalisé aussi sous la forme de la RFC 3626 [28]. Il se base sur le routage par état de lien comme décrit dans la partie. Chaque nœud implémentant le protocole OLSR diffuse régulièrement des informations de routage

Tableau 1.1: Table de routage de nœud numéro 2

Destination	Prochain saut	Métrique	Dest Number	Seq
1	1	1	127	
2	0	0	245	
3	3	1	124	
4	4	1	159	
5	4	2	147	
8	1	INF	789	

sur son propre voisinage afin de construire une image du réseau sur chaque nœud et de trouver une route vers n'importe quelle destination.

Le protocole OLSR optimise ce mécanisme en minimisant le trafic nécessaire pour que chaque nœud connaisse la topologie du réseau grâce aux relais multi points [29]. Avec l'utilisation de relais multi points, les nœuds de réseau évitent l'inondation simple (où chaque nœud retransmet simplement chaque nouveau paquet qu'il reçoit) et choisissent dans leurs voisins directs un sous-ensemble minimal de leurs voisins symétriques à un saut, de telles sortes à pouvoir atteindre tout le voisinage à deux sauts. La diffusion des informations sur les liens utilisés pour le routage se fait ensuite uniquement par les relais multi points.

L'avantage major des relais multipoints est de diminuer localement le nombre de retransmissions lors d'une inondation et minimiser par la suite l'utilisation de la bande passante : chaque nœud dispose d'un ensemble de relais multipoints choisis parmi ses voisins et seuls ces relais multipoints peuvent retransmettre les paquets émis par le nœud. Les paquets sont toutefois reçus par tous les voisins. Si l'ensemble des relais multipoints est plus petit que l'ensemble des voisins, il en résulte immédiatement une réduction du trafic retransmis ; en outre, plus cet ensemble est petit, plus la réduction du nombre de retransmissions est efficace.

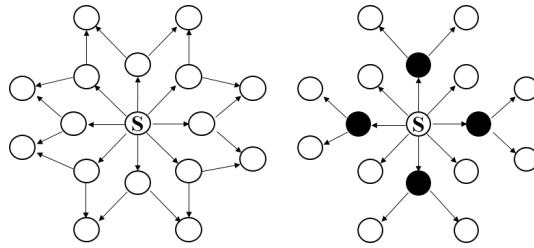


FIGURE 1.7: Relai Multipoint a : Transmission par inondation pure .b : Transmission avec les MPR

La figure 1.7 donne un exemple de gain en nombre de messages transmis. Le nombre de messages dans l'inondation simple (a) est de 54 messages, alors que dans le cas des Relais multipoint (b) est de 34 messages.

Afin de choisir ses relais multipoints, un nœud a besoin de connaître complètement la topologie de son voisinage à deux sauts ; cela est réalisé grâce à l'envoi périodique de paquets de contrôle HELLO contenant la liste des voisins connus à un saut.

L'ensemble des MPRs pour un nœud i , noté $\text{MPR}(i)$, est un sous-ensemble minimal choisi parmi ses voisins symétriques à un saut qui satisfont les propriétés suivantes :

- Chaque nœud parmi les voisins à deux sauts de i doit avoir un lien symétrique avec au moins un élément du sous-ensemble $\text{MPR}(i)$
- Plus le sous-ensemble des MPRs est petit, plus il est optimal.

Pour transférer les données le protocole OLSR maintient une table de routage dans chaque nœud qui permet de router les données vers toutes les destinations présentes dans le réseau. La table de routage est calculée sur la base des informations topologiques qui sont échangées au moyen de paquets de contrôle Topology Control (TC). Seul les MPR envoient des messages TC. Ainsi le MPR peut transmettre la liste de ses voisins qui l'on choisit comme MPR. Cela sert essentiellement à établir les tables de routage.

Ainsi, le protocole OLSR effectue deux actions principales :

- La détection de voisinage, grâce à l'envoi de messages HELLO et à la détermination des MPRs.
- La gestion de topologie, réalisée par l'intervention des messages TC, MID et HNA et aboutissant à une table de routage globale dans chaque nœud.

Pour découvrir les voisinages, chaque nœud doit diffuser un message HELLO, contenant les informations relatives aux interfaces que ce nœud entend, ainsi que leur état de lien

(figure 1.8).

- L'état « symétrique » signifie que le lien a été vérifié dans les deux sens, et qu'il est donc possible d'envoyer des données en unicast sur ce lien.
- L'état « Entendu » indique que le nœud reçoit les messages HELLO, venant de cette interface voisine, mais que le lien n'est pas encore valide dans l'autre sens.
- L'état « MPR » indique que ce nœud a choisi ce voisin comme relais multipoint, et que le lien est symétrique.
- L'état « Perdu » signifie que le lien correspondant est perdu et n'est plus valide.

Les messages Hello contiennent les informations suivantes pour chaque interface I :

- La liste des adresses des interfaces voisines, possédant un lien symétrique avec l'interface I.
- La liste des adresses des interfaces voisines qui sont entendus par I.
- La liste des adresses des interfaces voisines qui sont choisies comme relais multipoint
- La liste des adresses des interfaces voisines qui viennent d'être perdues.

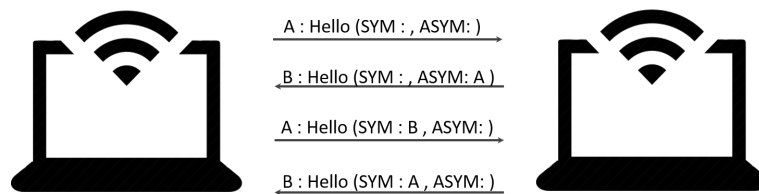


FIGURE 1.8: Envois de message HELLO

Les nœuds diffusent les messages Hellos à leurs voisins directs sur toutes les interfaces rattachées au nœud. Ces messages sont envoyés périodiquement.

Ainsi, chaque nœud maintient une base d'informations de voisinage pour toutes les interfaces voisines, les voisins à deux sauts et les MPRs. Elles sont alimentées et mises à jour périodiquement par les échanges des messages HELLO.

Tous les nœuds choisis comme relais multipoint doivent diffuser périodiquement dans le réseau un message TC contenant la liste des voisins de ce dernier qui l'ont désigné. Le numéro de séquence associé à cette liste est aussi envoyé dans le message TC.

Les messages TC sont diffusés dans tout le réseau en utilisant la diffusion optimisée d'OLSR par l'intermédiaire des relais multipoint.

La table de routage est mise à jour à chaque fois qu'on détecte un changement dans la

base de voisinage ou de la topologie. Plus précisément quand on détecte la disparition ou l'apparition d'un nœud dans le voisinage, ou la disparition ou l'apparition d'un tuple dans la topologie. Cette mise à jour n'entraîne aucune génération de message dans le réseau ; il s'agit d'un simple recalcul local.

1.5.3 Dynamic Source Routing (DSR)

DSR [30] est un protocole de routage pour les réseaux sans fil ad hoc qui a été proposé en 1996. Il a été normalisé sous la forme de la RFC 4728 [31]. Il se différencie des autres en particulier parce qu'il utilise le routage par la source : c'est une technique de routage dans laquelle l'expéditeur d'un paquet détermine la séquence complète des nœuds à traversés pour atteindre la destination ; l'expéditeur répertorie explicitement cette route dans l'en-tête du paquet, en identifiant chaque intermédiaire nœud auquel transmettre le paquet sur son chemin vers l'hôte de destination (figure 1.9).

Ce type de routage présente certains avantages particulièrement intéressants ; il autorise en particulier la source à conserver dans sa table de routage plusieurs chemins valides vers une même destination. Le choix du chemin emprunté pourra donc être fait indépendamment pour chaque paquet, et permettre un meilleur équilibrage de la charge sur les différents nœuds du réseau.

Ce protocole utilise une approche réactive qui élimine le besoin d'inonder périodiquement le réseau par des messages de mise à jour de table de routage qui sont requis dans l'approche proactive. Dans une approche réactive comme celle-ci, une route n'est établie que lorsqu'elle est requise et, par conséquent, le besoin de trouver des routes vers tous les autres nœuds du réseau est éliminé. Aussi les nœuds intermédiaires utilisent également les informations de cache de manière efficace pour réduire la surcharge de réseau par des paquet de contrôle. Le protocole DSR a deux phases, la phase de découverte de la route et la phase de maintenance de la route.

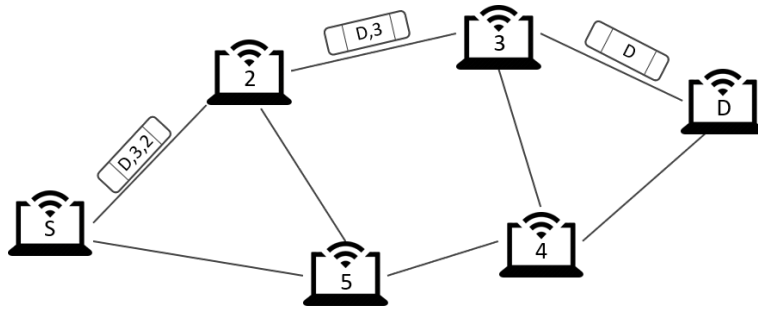


FIGURE 1.9: Emission d'un paquet dans le cas du routage par la source

• Découverte de route

La découverte de route permet à n'importe quel nœud du réseau ad hoc de découvrir dynamiquement une route vers n'importe quel autre nœud du réseau, soit directement accessible dans sa zone de transmission ou accessible via un ou plusieurs nœuds intermédiaires du réseau.

Lorsqu'un nœud cherche à émettre un paquet vers une destination pour laquelle il n'a pas de route en cache, le nœud initie une découverte de route vers la destination. La recherche de route se fait par la défusion d'un message RREQ (ROUTE REQUEST) à l'aide d'un mécanisme d'inondation. Ce message contient les informations nécessaires au bon fonctionnement de la découverte de route, à savoir : l'adresse du nœud initiateur, l'adresse de la cible, un identifiant unique de la requête, ainsi qu'une liste de tous les nœuds traversés par le message.

Lorsqu'un nœud reçoit un message RREQ, s'il n'est pas la cible de cette requête, alors il détermine s'il doit retransmettre la requête. Celle-ci ne sera retransmise que si aucune requête RREQ avec le même identifiant n'a été reçue et si le nœud n'apparaît pas dans la liste des nœuds traversés par le message RREQ. Avant l'éventuelle retransmission, le nœud s'ajoute à la liste des nœuds traversés.

Si le nœud recevant le message RREQ, il s'agit de nœud de destination, alors il va créer un message de réponse RREP (ROUTE REPLY) et l'envoiera au nœud source. Cette réponse contient la liste des nœuds traversés par le message RREQ reçu.

Afin de renvoyer le paquet de réponse RREP à l'initiateur de RREQ, l'hôte cible doit avoir une route vers l'initiateur.

Si la cible a une route vers le nœud initiateur dans son cache, elle peut alors envoyer le

paquet de réponse RREP en utilisant cette route de la même manière que pour l'envoi de tout autre paquet. Dans le cas contraire, deux solutions sont possibles :

1. La cible va utiliser la liste des nœuds traversés dont l'inverse est l'utilisé comme route pour la réponse RREP. Cependant, ceci nécessite que la communication réseau sans fil entre chacune de ces paires d'hôtes fonctionne de manière bidirectionnelle, ce qui peut ne pas être le cas dans certains environnements ou avec certains protocoles de niveau MAC.
2. L'approche alternative c'est d'utiliser le mécanisme de découverte de route pour obtenir une route de la cible au nœud initiateur de la première requête. Si cette approche est utilisée ; la réponse RREP doit être incluse « sur le dos » du nouveau message RREQ (piggyback) afin d'éviter toute boucle ;

Lorsque le nœud initiateur reçoit une réponse RREP, la route fournie est mise en cache afin de pouvoir être réutilisée ultérieurement. Les paquets mis en tampon pour la cible sont finalement émis.

● Maintenance de route

Lors de l'acheminement d'un paquet d'une source à une destination, chaque nœud transmettant le paquet est responsable d'acquitter ou de confirmer que le paquet a été reçu par le prochain saut le long de la route source ; le paquet est retransmis (jusqu'à un nombre maximum de tentatives) jusqu'à ce que cette confirmation de réception soit reçue. Cet acquittement peut avoir plusieurs formes :

- Si la couche MAC fournit un acquittement pour la réception des trames (comme la trame d'accusé de réception de niveau liaison définie par IEEE 802.11 [32]), cet acquittement est automatiquement utilisé comme acquittement du paquet.
- Si le nœud qui a retransmet le paquet « entend ». le nœud qui l'a reçu envoyer le paquet vers le nœud suivant sur la route, alors le paquet est considéré comme acquitté.
- Ou une approche plus directe consiste à demander explicitement un acquittement par l'envoi d'un simple message. Dans un tel cas, il est possible de considérer l'acquittement comme valide pour un temps limité et de ne pas requérir d'acquittement pour les prochains paquets émis dans cet intervalle de temps.

Si le paquet est retransmis un nombre maximum de fois et qu'aucune confirmation de réception n'est reçue, ce nœud renvoie un message RERR (ROUTE ERROR) à l'expéditeur

d'origine du paquet (figure 1.10), identifiant le lien sur lequel le paquet n'a pas pu être transféré, afin de les prévenir que celles-ci ne sont plus valides.



FIGURE 1.10: Exemple de maintenance de route

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le contexte général des réseaux mobiles Adhoc. Ainsi que les contraintes, les problèmes de conception de ce type de réseaux et les domaines d'application. Ensuite une classification des protocoles de routage dans les manets est présentée, ainsi qu'une description de quelques protocoles de routage est aussi présentée.

Le prochain chapitre, présente le concept de qualité de service dans les réseaux mobiles Adhoc, plus particulièrement le routage avec qualité de service et les problèmes rencontrés dans le contexte ad hoc. Ainsi qu'un aperçu sur les techniques proposées dans la littérature pour améliorer la qualité de service, notamment en termes d'énergie.

Etat de l'art sur la qualité de service et l'énergie dans les réseaux MANETs

Sommaire

2.1	Introduction	25
2.2	Etat de l'art sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc	27
2.2.1	Qualité de Service	27
2.2.2	Métriques de la qualité de service	28
2.2.3	Difficultés rencontrées par QoS dans les MANETs	30
2.2.4	Solutions de qualité de service dans les réseaux mobile ad hoc	30
2.2.5	Solutions au niveau Modèles de qualité de service	31
2.2.6	Solutions au niveau de la couche MAC	33
2.2.7	Solution au niveau protocoles de signalisation	35
2.2.8	Solution au niveau Routage	36
2.3	Etat de l'art sur l'énergie dans les MANETs	38
2.3.1	Modèle de consommation d'énergie	38
2.3.2	Facteurs de surconsommation d'énergie	40
2.3.3	Conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc	42
2.4	Conclusion	48

2.1 Introduction

Les nœuds des réseaux ad hoc fonctionnent sur une batterie et disposent de ressources énergétiques limitées. L'efficacité énergétique est donc une importante préoccupation pour

assurer la longévité du système. Plusieurs travaux [33][34] ont montré que l'activité réseau est très coûteuse en énergie. L'émission ainsi que la réception consomment une énergie importante. Par conséquent, des solutions de communication efficaces sur le plan énergétique présentent un grand intérêt.

De plus, dans certaines circonstances, les MANET peuvent être déployés dans des zones éloignées ou hostiles, cela rend impossible de remplacer ou de recharger les batteries. Par conséquent, il est souhaitable de garder le niveau de consommation d'énergie aussi bas que possible afin d'éviter le remplacement fréquent des batteries.

La conservation de l'énergie a posé un énorme défi en raison de la nature du contrôle distribué des MANET. Dans les réseaux mobiles ad hoc, l'efficacité énergétique est plus importante que les autres réseaux sans fil. En raison de l'absence d'infrastructure, les nœuds doivent aussi jouer le rôle de routeur. Étant donné qu'un MANET est un réseau "coopératif", les nœuds se joignent au processus de réacheminement des paquets, par conséquent, les charges de trafic sur les nœuds sont plus lourdes que dans d'autres réseaux sans fil avec des points d'accès fixes ou des stations de base.

L'énergie consommée par un nœud ad hoc peut être classée en deux catégories : l'énergie non liée à la communication et l'énergie liée à la communication. L'énergie liée à la communication peut, à son tour être classée en énergies de traitement des messages, énergie de transmission, énergie de réception et énergie relative au mode veille.

Le problème de l'énergie dans les MANET peut être abordé à différents niveaux. Et ces dernières années, de nombreux chercheurs [35][36] sont concentrés sur l'optimisation de la consommation d'énergie sous différents points de vue. Certaines de ces solutions tentent d'ajuster la puissance de transmission des nœuds sans fil, d'autres propositions tendent à gérer efficacement l'état de veille pour chaque nœud. Enfin, il existe de nombreuses propositions qui tentent de définir un protocole de routage efficace, capable de router les données sur le réseau et d'économiser le niveau d'énergie des nœuds. Ces propositions sont souvent complètement nouvelles, tandis que d'autres visent à ajouter des fonctionnalités de consommation d'énergie aux protocoles existants (comme AODV, DSR et OLSR).

Ce chapitre présente dans un premier temps, un état de l'art sur la qualité de service, les difficultés et les solutions proposées dans les réseaux Ad hoc. Après nous concentrons sur le problème énergétique. dans le quelle on présente une définition du modèle énergétique pour le calcul de la consommation d'énergie. Ensuite nous allons essayer d'analyser les facteurs qui peuvent être la source de la surconsommation de l'énergie par rapport au nœud dans sa conception et dans son fonctionnement. Et à la fin nous présentons un état

de l'art sur les approches de conservation d'énergie proposées dans la littérature.

2.2 Etat de l'art sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc

2.2.1 Qualité de Service

La QoS comme définie dans le RFC 2386 [37] est définie comme un ensemble d'exigences de service doivent être satisfaites par le réseau lors du transport d'un flux de paquets d'une source vers sa destination. Les besoins du réseau sont régis par les exigences de service des applications de l'utilisateur final. Le réseau doit garantir aux utilisateurs un ensemble d'attributs de service prédéterminés et mesurables en termes de performance de bout en bout, tels que le délai, la bande passante, le taux de perte de paquets, la variance de délai (gigue), etc. en plus, la consommation d'énergie est un autre attribut de la qualité de service qui est plus spécifique aux MANET.

De nos jours, les applications exigent plus en plus de ressource et de la qualité de service telles que la vidéo à la demande avec des exigences de bande passante, la voix sur IP avec des exigences sur les délais de bout en bout et sur leurs variations.

Le déploiement de telles applications dans les MANETs représente de nombreux intérêts, cependant nous sommes amenés à faire face à plusieurs défis et difficultés, et trouver des solutions fiables qui aident à l'intégration de la qualité de service dans ce type de réseaux.

Le groupe MANET de l'IETF (International Engineering Task Force) a proposé plusieurs protocoles de routage pour les réseaux mobiles ad hoc. Ceux-ci fonctionnent en mode best effort (c'est-à-dire ne fournissent aucune garantie concernant la perte ou le retard des paquets, la bande passante disponible, la gigue, etc.). Dans un mode best effort, les paquets sont supprimés quelle que soit leur importance. Si un paquet est perdu, l'expéditeur peut simplement le retransmettre. Cette méthode est efficace pour les applications qui ne nécessitent pas de limites sur les délais de transmission des paquets ou d'autres mesures de qualité de service. Cependant, les applications en temps réel, telles que la vidéo à la demande, la vidéo conférence et la téléphonie sur Internet, sont sensibles à la perte et au retard des paquets et peuvent nécessiter une bande passante minimale. Par conséquent, le mode best effort peut ne pas convenir à ces applications.

Généralement, la recherche sur la qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc touche plusieurs domaines, Wu et Harm [38] ont présenté un état de l'art sur la qualité de service dans les MANETS, et ont classifié les solutions de QoS en quatre grands axes :

- Les modèles de QoS spécifient une architecture dans laquelle certains types de services peuvent être fournis.
- Les protocoles d'accès au médium fournissent un ensemble d'outils permettant de mettre en œuvre certaines règles de qualité de service
- Les protocoles de routage avec qualité de service cherchent les routes ayant suffisamment de ressources disponibles pour satisfaire une requête.
- Les protocoles de signalisation cherchent à offrir des mécanismes de réservation de ressources indépendants du protocole de routage sous-jacent.

Cette thèse ne traite pas les modèles de qualité de service ou la qualité de service au niveau de la couche MAC mais il se concentre sur la qualité de service au niveau de la couche réseau et des protocoles de routage. Pour ce faire, nous détaillerons quelques principales notions de la qualité de service, les métriques, les solutions et le problème de routage avec QoS dans les MANETS, ainsi qu'une présentation de quelques protocoles de routage avec QoS dans les réseaux Ad hoc.

2.2.2 Métriques de la qualité de service

La QoS est généralement définie comme un ensemble de services devant être pris en charge pendant la transmission de paquets. Un protocole compatible avec la qualité de service devrait prendre en charge plusieurs métriques en termes de débit de bout en bout, de délai et de taux de distribution des paquets.

Les métriques de QoS peuvent être additives, concaves ou multiplicatives ;

- Une métrique additive A_m est définie comme $\sum_{i=0}^h Li(m)$ où Li est la valeur de la métrique m sur le lien Li , $Li \in P$. h représente la longueur du chemin P .
- Une métrique concave définit la valeur minimale sur un chemin P et représenté comme suit : $m = \min(li(m)), Li(m) \in P$.
- Une métrique multiplicative représente le produit des valeurs des métriques de QoS, elle est définie comme le produit des $Li(m)$ avec i allant de 1 à h , $Li(m) \in P$.

La bande passante est une métrique concave, alors que le délai et la gigue sont des métriques additives. La disponibilité d'un lien, basée sur des critères comme la probabilité

de perte du lien quant à elle est une métrique multiplicative.

- **Bande passante**

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

- **Délai de bout en bout**

Le terme « délai » représente le temps écoulé entre l'envoi du paquet par le nœud d'origine et l'arrivée du paquet à la destination. Il peut varier considérablement en raison des longues files d'attente ou d'un environnement réseau congestionné, et englobe en réalité trois aspects temporels différents :

1. le délai de propagation, déterminé par la distance physique qui sépare la source de la destination.
2. le délai d'attente et de traitement des paquets à l'intérieur des files d'attente, déterminé par la charge du réseau, ainsi que les politiques de traitement de l'information dans les routeurs pour obtenir une fluidité maximale de l'écoulement de l'information.
3. le délai de transmission dépendant de la taille des flots. Ce paramètre est aussi étroitement lié à l'utilisation du réseau et au partage de la bande passante disponible.

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

- **Gigue : (variation du délai)**

La gigue correspond à la variation du délai de transmission de bout en bout entre les différents paquets d'un flot à travers un réseau. La gigue est due principalement aux délais de traitement variables dans les nœuds du réseau. Ce paramètre affecte automatiquement la qualité de service demandée.

- **Perte de paquets**

Elle se produit lorsqu'il y a des erreurs d'intégrité sur les données, principalement lorsque l'intensité du trafic sur les liens devient supérieure à leur capacité de débit.

2.2.3 Difficultés rencontrées par QoS dans les MANETs

Les MANET se diffèrent des réseaux d'infrastructures traditionnelles. La différence entraîne des difficultés pour atteindre la qualité de service dans ces réseaux. La liste suivante énumère certains de ces problèmes :

- **Topologies dynamiques**

Les nœuds sont libres de se déplacer arbitrairement ; ainsi, la topologie du réseau peut changer de manière aléatoire et rapide à des moments imprévisibles.

- **Bande passante**

La bande passante et la capacité des MANET sont limitées [39] et le canal n'est pas fiable car il est affecté par les interférences, le bruit et les évanouissements sur plusieurs chemins [40]. En outre, il existe un problème d'estimation de la bande passante dans les MANET, où l'on ne peut pas estimer précisément la bande passante disponible sur un nœud, car elle varie beaucoup en fonction de la mobilité du nœud et d'autres dispositifs sans fil transmettant à proximité, etc.

- **Propriétés des liens**

Le support de transmission dans les réseaux Ad hoc est très imprévisible, aussi les collisions des paquets sont incontournables. La propagation du signal est confrontée à des difficultés telles que l'atténuation, le brouillage et l'interférence. Ces propriétés du réseau sans fil rendent les mesures telles que la bande passante et le délai imprévisibles.

- **Contraint d'énergie**

Dans les réseaux MANETs, certains ou tous les nœuds peuvent dépendre d'une batterie ou d'une autre source épuisable d'énergies. Pour ces nœuds, le critère de conception de système le plus important pour l'optimisation peut être l'économie d'énergie.

2.2.4 Solutions de qualité de service dans les réseaux mobile ad hoc

Les solutions existantes dans la littérature peuvent être classifiées en quatre parties (table 2.1) : Les modèles de QoS, la différenciation au niveau de la couche MAC, les protocoles de signalisation, et le routage avec QoS. Dans le reste de cette partie, nous allons présenter les solutions proposées au niveau MAC, puis les protocoles de routage avec le support de la QoS. Le protocole de réservation de ressource INSIGNIA sera décrit,

suivi des modèles de qualité de service développés spécialement pour les réseaux ad hoc.

Protocoles de signalisation	Modèles de qualité de service (Inter couche)
Routage avec QoS	
Différentiation au niveau de la couche MAC	

Tableau 2.1: Solutions de QoS dans les MANETs

2.2.5 Solutions au niveau Modèles de qualité de service

Le modèle de qualité de service définit le mécanisme pour atteindre la qualité de service. L'internet a été basé sur le (modèle) best effort dont lequel le réseau tente d'acheminer tout le trafic dès que possible dans les limites de ses capacités, mais sans garantie de débit, de délai ou de perte de paquets. Bien que best effort reste adéquat pour la plupart des applications, le support QoS est nécessaire pour satisfaire le besoin croissant de multimédia sur IP, comme le streaming vidéo ou la téléphonie IP. Les modèles de qualité de service existants peuvent être classés en deux types en fonction de leur fonctionnement fondamental : Le modèle IntServ (Integrated Services) et Le modèle DiffServ (Differentiated Services). Cependant, ces modèles ne sont pas adaptés aux contraintes des réseaux ad hoc telles que la mobilité.

2.2.5.1 IntServ

spécifié dans le RFC 1633 [41] ce modèle permet d'assurer une qualité de service au niveau des flux de données pour répondre à des contraintes de délais et améliorer le service Best Effort. Mais d'une part, il requiert un important volume de traitements entraînant des problèmes de surcharge, et d'autre part, la réservation de ressources assurée par le protocole RSVP (Resource Reservation Setup Protocol) consomme une grande quantité de bande passante qui représente une ressource limitée dans les réseaux ad hoc.

2.2.5.2 DiffServ

Spécifié dans le RFC 2475 [42], a été conçu pour surmonter la difficulté de mettre en œuvre et de déployer IntServ et RSVP, et nécessite moins de modifications du réseau pour

être mis en place, mais qui fournit également moins de garanties. Il assure une qualité de service à l'aide de files d'attente associées à chaque catégorie de service. Il aurait été plus adapté aux réseaux ad hoc s'il ne consommait pas autant de bande passante et s'il n'était pas basé sur une topologie statique.

C'est alors que, plusieurs modèles de QoS pour les réseaux ad hoc ont été proposés tels que le modèle SWAN [43], qui est une adaptation des modèles IntServ et DiffServ, et le modèle FQMM [44] qui est un modèle hybride et d'autres comme iMAQ [45].

2.2.5.3 Modèles spécifiques aux réseaux ad hoc

- **FQMM (Flexible Quality of service Model for Manets)**

Le modèle FQMM [44] fut le premier modèle de qualité de service proposé pour les réseaux ad hoc en 2000. Il combine les propriétés des modèles filaires IntServ et DiffServ en offrant une méthode d'approvisionnement hybride : par flux, pour les trafics prioritaires et par classe, pour les autres trafics. Mais il est adapté aux réseaux ad hoc de petite ou moyenne taille (constituée d'une cinquantaine de nœuds mobiles).

Cette hybride technologie a été conçue a pour but de pouvoir connecter, à long terme, les réseaux ad hoc avec des réseaux filaires reliés à Internet. En effet, cela assure une certaine compatibilité avec les modèles originels d'Internet.

- **SWAN (service differentiation in Stateless Wireless Ad Hoc Networks)**

Le modèle SWAN [43] est une adaptation du modèle DiffServ aux réseaux mobiles ad hoc. Il met en œuvre un contrôle d'admission des paquets. Un paquet est accepté si la bande passante de la route qu'il doit emprunter est suffisante pour assurer son transit sans occasionner de congestion du réseau.

Cependant, ce modèle n'apporte aucune garantie quant au maintien de la communication entre deux entités pour un trafic en cours : en fonction des variations de la bande passante, le trafic est maintenu ou coupé. De plus, le protocole de routage utilisé est de type Best Effort, ce qui signifie que lorsqu'un paquet est envoyé, il n'y a aucune vérification quant à son arrivée à destination et donc aucune assurance vis-à-vis de la "livraison" d'un paquet.

- **iMAQ (Integrated Mobile Ad hoc Qos framework)**

Le modèle iMAQ (Integrated Mobile Ad hoc Qos framework) [45] prend en charge la transmission de données multimédia dans un MANET. Le modèle comprend une couche

de routage ad hoc et une couche de service logiciel (Middleware). Dans chaque nœud, ces deux couches partagent les informations et communiquent pour fournir des garanties de qualité de service pour le trafic multimédia.

Le protocole de routage est basé sur la prédiction de la position des nœuds (prédictive location-based) et orientée QoS. La couche Middleware communique également avec la couche application et la couche réseau et tente de prédire le partitionnement du réseau. Pour assurer une meilleure accessibilité aux données, il réplique les données entre les différents groupes du réseau avant le partitionnement.

2.2.6 Solutions au niveau de la couche MAC

Les propriétés spécifiques du médium radio rendent l'utilisation d'un protocole d'accès au médium une tâche essentielle. Le rôle du protocole d'accès est multiple, il permet d'éviter les collisions, de garantir le partage de la bande passante et de résoudre certains problèmes spécifiques aux transmissions sans fil comme le problème de stations cachées et exposées.

Pour cela, un protocole MAC avec QoS est nécessaire pour garantir les meilleures performances de support QoS. Des schémas de différenciation des services au niveau MAC ont été proposés.

2.2.6.1 Différenciation de services pour 802.11

Récemment, des schémas de différenciation de service au niveau MAC ont été proposés. Néanmoins, ils sont souvent basés sur un contrôle centralisé. Dans les réseaux sans fil multi sauts, un contrôle distribué est nécessaire. Le protocole MACA/PR (Multihop Access Collision Avoidance with Piggyback Reservation) [46] propose de fournir des garanties de bande passante pour les applications en temps réel via une réservation. Il permet d'établir des connexions en temps réel à un saut seulement. Il utilise un dialogue RTS/CTS (Request To send/ Clear To Send) avec acquittement, et différencie la politique d'accès au médium selon la nature des flux. Pour le trafic prioritaire, une seule demande d'autorisation à transmettre (RTS-CTS) au début du flux est utilisée (jusqu'à perte d'un paquet). Dans chaque paquet, des informations sur l'ordonnancement du paquet suivant sont incluses pour empêcher les voisins d'entrer en collision avec les prochains paquets.

2.2.6.2 Différenciation de service basée sur la fonction DCF du protocole 802.11

Dans le but d'améliorer la méthode d'accès DCF du protocole 802.11, les techniques suivantes ont été proposées :

Fonction de backoff différente [47] : le principe est d'attribuer des valeurs de fenêtres de contention (CW) supérieures pour les stations les moins prioritaires et inversement, permettant ainsi de donner plus de chance à une station prioritaire d'accéder au canal.

Différents DIFS [48] : dans le standard IEEE 802.11 de base, les trames ACK ont une priorité sur les trames RTS, en attendant un temps SIFS qui est inférieur à DIFS (pour RTS). Dans cette technique de différenciation, la même idée est utilisée, où chaque station mobile dispose de sa propre valeur de DIFS qui définit son niveau de priorité pour l'accès au médium,

Distributed Fair Scheduling [49] : dans ce schéma d'accès la valeur du backoff générée avant un envoi, est proportionnelle à la longueur de la trame de donnée et inversement proportionnelle au poids du flux,

BlackBurst [50] : il impose des conditions telles qu'un intervalle constant pour accéder au lien et la possibilité de bloquer le canal pendant une période de temps,

Différente longueur maximale de trame [48] : où chaque station a une priorité qui lui permet d'envoyer des trames ayant une taille maximale différente,

Différenciation des valeurs de CW_{min} de la fenêtre de contention : il utilise des valeurs de CW_{min} et CW_{max} différentes, où $CW_{min}(highprio) < CW_{min}(lowprio)$, et $CW_{max}(highprio) < CW_{max}(lowprio)$.

D'autres approches [51] utilisent une différenciation basée sur les flots ou sur les files au lieu d'une priorité affectée par station mobile. L'étude réalisée dans [52], montre que l'utilisation du paramètre DIFS pour la différenciation de service montre de bons résultats.

Un mécanisme de priorité pour la fonction DCF de la couche MAC 802.11 a été étudié dans [48]. Il consiste à différencier les trafics, et introduire une priorité en modifiant les paramètres de la fonction d'accès DCF. Son principe consiste à associer des DIFS ou des temps de backoff plus courts pour les flux prioritaires. Ainsi, les flux prioritaires auront une plus grande probabilité d'accéder au médium que les autres. D'autres paramètres de la fonction DCF peuvent aussi être utilisés pour différencier des services.

2.2.6.3 IEEE 802.11e

IEEE 802.11e [53] propose le support de la QoS dans les réseaux sans fil avec une nouvelle fonction de contrôle EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), considérée comme la nouvelle version de la fonction DCF, et une fonction de coordination hybride (HCF). EDCA introduit quatre catégories de trafics (TC). Les priorités sont contrôlées par les stations en modifiant le schéma d'accès de base (DCF), plus flexible que la fonction PCF, HCF est utilisée par les points d'accès pendant la période d'accès contrôlée (CAP), qui peut commencer à n'importe quel moment durant 'la superframe'. Autrement dit, ça lui permet d'avoir accès au médium pour faire passer un trafic ayant des contraintes de QoS.

2.2.7 Solution au niveau protocoles de signalisation

La signalisation constitue un autre élément essentiel de la qualité de service dans les réseaux. Elle permet de réserver et libérer des ressources du réseau, d'initialiser et d'arrêter le trafic ainsi que de renégocier le profil du trafic.

Une signalisation efficace repose sur la fiabilité du transfert des signaux entre les routeurs et sur la bonne interprétation de ces signaux par les routeurs.

La signalisation peut s'effectuer à l'intérieur des paquets de données (signalisation in-band) c'est à dire que les données de contrôle sont incluses et transmises dans les entêtes des paquets de données ou grâce à des paquets explicites de contrôle (signalisation out-band). Concevoir un protocole de signalisation consiste à définir les données à échanger afin de réaliser une tâche particulière ainsi que la manière de les échanger. Le premier protocole de signalisation utilisé dans les réseaux mobiles ad hoc est INSIGNIA [54] qui est aussi un modèle de QoS.

2.2.7.1 INSIGNIA

Le système de signalisation INSIGNIA [54] est un système de signalisation qui s'adapte relativement bien à la structure des réseaux ad hoc. Il est basé sur un système de signalisation In-band, où les messages de contrôle sont encapsulés comme une option dans les paquets de données IP. Ceci permet de réduire le nombre de paquet de controle généré par les messages de signalisation ainsi que d'éviter de surcharger le réseau; contrairement à

une signalisation "out-band" explicite.

INSIGNIA supporte deux types de services (temps réel et best effort). Il offre des algorithmes de réservation, restauration et d'adaptation rapides pour répondre aux changements de topologie du réseau et aux dégradations des liens sans fil.

De plus, INSIGNIA permet de déterminer la quantité de bande passante à attribuer à chaque paquet et de réserver cette bande passante, assurant ainsi une certaine qualité de service.

Cette réservation est de type soft-state, ce qui implique que les ressources sont libérées automatiquement si elles ne sont pas utilisées durant un certain laps de temps paramétrable. Là encore, cette caractéristique est adaptée aux Manets puisque les ressources seront libérées sans demande spécifique et sans besoin notamment du lien d'allocation, ce qui est pratique dans un réseau où les liens sont peu fiables et la topologie est dynamique.

L'un des inconvénients d'une telle approche est le fait d'avoir des informations sur les trafics dans chaque nœud ce qui pose des problèmes de capacité des nœuds, et la difficulté de passage à l'échelle avec l'augmentation du nombre de flux. En outre, cette approche n'offre que deux types de service temps réel et best effort. Finalement, INSIGNIA ne supporte que les applications multimédia adaptatives, et la réservation de ressource ne peut être établie que lorsque le trafic est lancé.

2.2.8 Solution au niveau Routage

Les algorithmes de routage traditionnels présentés dans les parties précédentes ont été proposés pour router les données sans prendre en considération des contraintes ou les demandes des utilisateurs. Ainsi, ils sont inadaptés aux applications qui demandent le support de la qualité de service.

Le problème essentiel pour prendre en charge la QoS dans les réseaux mobiles ad hoc est de trouver une route avec suffisamment de ressources pour répondre aux contraintes de QoS, telles que la recherche du coût le plus bas ou le plus stable des routes répondant aux contraintes de QoS. Selon ces objectifs, Han et al. [55] définissent les considérations de conception de base pour un protocole de routage avec QoS. Ces considérations peuvent être résumées comme suit :

1. Estimation des ressources : il est nécessaire de connaître les informations sur la

bande passante disponible pour effectuer les appels d'admission et l'adaptation de la qualité de service.

2. Réservation des ressources : il est intéressant de savoir comment allouer les ressources en bande passante et quel type de réservation des ressources peut être effectué.
3. Récupération de route : la conception d'un protocole de routage avec QoS doit intégrer une technique rapide de récupération de route, à cause des fréquentes défaillances de routes en raison de la mobilité des nœuds.
4. Sélection de route : le protocole de routage avec QoS doit prendre en compte les informations sur les différentes métriques de QoS lors de la sélection d'une route appropriée.

Plusieurs protocoles de routage ont été développés pour fournir une qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc, prenant en considération un ou plusieurs métriques citées précédemment. La plupart des protocoles de routage avec QoS sont les extensions des protocoles de routage existants best-effort. Par conséquent, ils peuvent également être classés en deux catégories différentes : réactive et proactive. De nombreux protocoles de routage avec QoS réactifs et proactifs ont été proposés pour les MANET. Par exemple le protocole CEDAR (Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing algorithm)[56] qui est un protocole de routage réactif fournissant une qualité de service au niveau de la bande passante. Ce protocole se base sur le concept de sous-réseau. Les nœuds de réseau se divisent en deux types, des nœuds appartenant au cœur du réseau et des nœuds ordinaires. Les nœuds sont donc soit du cœur, soit du voisin d'un nœud du cœur. Seuls les nœuds du cœur sont responsables de la propagation des paquets de contrôle et de la variation de la bande passante.

Les auteurs [57] affirment que le trafic devrait être équilibré pour éviter la congestion et proposent un protocole QoS-based Robust Multipath Routing (QRMR) pour améliorer la capacité du réseau. Dans le protocole QRMR, la destination envoie des paquets Route REply (RREP) avec des informations de coût telles que la qualité de lien, la qualité du canal et le délai de bout en bout. Lors de la réception des RREP, la source choisit le chemin avec un coût minimal. Les résultats de simulation montrent que le taux de réception de paquets pour QRMR est amélioré d'environ 50% et que le délai est réduit de la moitié.

Il y a d'autres protocoles proposés qui sont des extensions de protocoles bien étudiés comme (DSDV, DSR and AODV). Les auteurs de [58][59] proposent des protocoles basés sur le draft IETF [60].

Une autre solution basée sur AODV est le protocole BEQR (Bandwidth Estimation

QoS Routing protocol [61], ce protocole propose une technique pour améliorer la qualité de service par l'estimation approximative de la bande passante pour répondre au trafic réseau, cette approche se base sur l'utilisation de deux méthodes d'estimation de la bande passante pour trouver la bande passante résiduelle disponible à chaque nœud pour supporter de nouveaux flux.

De plus, W.E. Castellanos dans [62] propose le protocole AQA-AODV basé sur le protocole AODV. Ce protocole crée des routes en fonction des exigences de qualité de service des applications. Les auteurs introduisent des mécanismes d'estimation de bande passante disponible et un modèle adaptatif pouvant fournir une réponse au nœud source concernant l'état actuel du réseau, pour permettre à l'application d'ajuster correctement le débit de transmission. De même, ils proposent une approche de récupération de route qui fournit un mécanisme permettant de détecter les défaillances sur une route et de rétablir les connexions en tenant compte les conditions de qualité de service établies dans la précédente phase de découverte de route.

Certains protocoles de routage avec QoS pour les réseaux ad hoc sans fil sont résumés dans le tableau 2.2. Les protocoles présentés traitent les problèmes d'estimation de la bande passante et du délai, de la découverte de routes avec qualité de service, de la réservation des ressources et de l'approche utilisée pour la maintenance des routes. Une présentation détaillée de ces protocoles est décrite dans [45].

2.3 Etat de l'art sur l'énergie dans les MANETs

2.3.1 Modèle de consommation d'énergie

Une interface réseau sans fil peut se trouver dans l'un des quatre états suivants : transmettre, (Émission), recevoir (réception), inactif ou veille. Chaque état représente un niveau de consommation d'énergie différent.

- Transmettre : le nœud transmet une trame avec une énergie de transmission P_{tx} ;
- Recevoir : le nœud reçoit une trame avec une énergie de réception P_{rx} . Cette énergie est consommée même si la trame est supprimée par le nœud (car elle était destinée à une autre destination ou elle n'a pas été correctement décodée) ;
- Inactif (écoute) : même si aucun message n'est transmis sur le support, les nœuds restent inactifs et continuent à écouter le support avec une énergie P_{idle} ;

Protocole de routage	Métrique de QoS	Estimation Délai/ bande passante	Découvert de route	Réservation de res- source	Prédiction de dé- faillance de route	Multi route
CEDAR	Bande pas- sante	Non	Proactive/ Réactive	Oui	Non	Non
Ticket- based	Bande passante et délai	Non	Réactive	Oui	Non	Oui
OLSR- based	Bande pas- sante	Oui	Proactive	Non	Non	Non
AQOR	Bande passante et délai	Oui	Réactive	Oui	Non	Non
ADQR	Bande pas- sante	Oui	Réactive	Oui	Oui	Oui
TDR	Bande pas- sante	Non	Réactive	Oui	Oui	Non
BEQR	Bande pas- sante	Yes	Réactive	Non	Non	Non

Tableau 2.2: Comparaison entre quelques protocoles de routage avec QoS

- Veille : lorsque la radio est éteinte et que le nœud n'est pas capable de détecter les signaux. Aucune communication n'est possible. Le nœud consomme une énergie P_{sleep} qui est largement plus petit que toute autre mode.

La table 2.3 présente des valeurs typiques de consommation d'énergie pour une interface sans fil (mesurée pour la carte sans fil Lucent WaveLAN Silver 802.11b).

Etat	Quantité d'énergie consommée
Transmit	$P_{tx}=1.3W$
Receive	$P_{rx}=0.9W$
Idle	$P_{idle}=0.74W$
Sleep	$P_{sleep}=0.047W$

Tableau 2.3: Energie consommée dans chaque mode

L'énergie gaspillée lors de la transmission (E_{tx}) ou de la réception (E_{rx}) d'un paquet peut être calculée comme suit :

$$E_{tx} = P_{tx} \times \text{Durée} \quad (2.1)$$

$$E_{rx} = P_{rx} \times \text{Durée} \quad (2.2)$$

Où Durée indique la durée de transmission du paquet.

Lorsqu'un émetteur transmet un paquet au saut suivant, en raison de la nature partagée du support sans fil, tous ses voisins reçoivent ce paquet même s'il n'est destiné qu'à un seul d'entre eux. De plus, chaque nœud situé entre la portée de l'émetteur et la plage d'interférence reçoit ce paquet mais ne peut pas le décoder. Ces deux problèmes génèrent une perte d'énergie. Donc, pour calculer l'énergie gaspillée par une transmission, il faut prendre en compte ces pertes comme suit :

$$\text{cost}_{tx}(i) = E_{tx} + n \times E_{rx} \quad (2.3)$$

Où n représente le nombre de nœuds qui sont en mode Inactif appartenant à la zone d'interférence de l'émetteur i .

2.3.2 Facteurs de surconsommation d'énergie

2.3.2.1 Retransmission

Dans un réseau ad hoc les nœuds utilisent le support radio pour transmettre les données. Si plusieurs nœuds transmettaient simultanément des données vers une même destination cela peut entraîner des collisions au niveau de la destination, ce qui entraîne une perte de données. Certaines applications exigent une qualité de service ce qui demande parfois la retransmission des données perdues et engendre des coûts supplémentaires en termes d'énergie gaspillé. Si nous considérons une seule retransmission, la quantité d'énergie gaspillée est deux fois plus grande que celle qui devait être utilisée pour une transmission normale. Beaucoup de travaux dans la littérature tentent de solutionner ce problème en

proposant des mécanismes d'accès au canal (niveau MAC) pour les réseaux ad hoc afin de permettre une utilisation efficace de l'énergie.

2.3.2.2 Ecoute passive

L'écoute passive se produit lorsqu'un nœud est à l'écoute du canal alors qu'il y a aucune transmission. Cela, peut de façon abusive engendrer une consommation considérable et inutile d'énergie. La solution basique qui est préconisée contre ce phénomène est de faire basculer la radio en mode veille le plus longtemps possible surtout dans le cas des réseaux à faible trafic.

2.3.2.3 Ecoute abusive

L'écoute abusive se produit lorsqu'un nœud reçoit des données destinées à un autre nœud du réseau en raison de la nature partagée du support sans fil. Ce problème peut conduire à une consommation d'énergie importante, spécialement dans des réseaux très denses avec un trafic très élevé.

2.3.2.4 Surcharge

Les protocoles d'accès au média et de routage fonctionnent en échangeant des informations de signalisation, de connectivité, de réservation de ressources, etc. Ces informations sont connues sous le terme messages de contrôle ou overhead et permettent de garantir une certaine cohérence du réseau. Cette charge additionnelle du réseau entraîne une consommation supplémentaire de l'énergie mais aussi une détérioration des performances (si elle est générée de façon abusive).

2.3.2.5 Taille des paquets

La taille des paquets transmis peut aussi être une source de surconsommation d'énergie. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop courte ni trop longue. Une taille de paquet trop petite nécessite souvent qu'une donnée soit segmentée en plusieurs paquets, d'où plusieurs transmissions accompagnées des informations de contrôle. Le contraire, c'est-à-dire, une taille de paquet trop importante nécessite elle aussi plus de puissance de transmission donc plus d'énergie gaspillé par la radio.

2.3.3 Conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc

2.3.3.1 Contrôle de la puissance de transmission

La puissance de transmission détermine la portée sur laquelle le signal peut être reçu de manière cohérente, et joue donc un rôle crucial pour déterminer les performances du réseau (en termes de débit et de consommation d'énergie). Par conséquent, le niveau de la puissance de transmission détermine la portée de transmission, la qualité du signal reçu et les interférences qu'il crée pour les autres récepteurs. Le contrôle de la puissance de transmission a été étudié principalement comme un moyen énergétique efficace pour améliorer les protocoles MAC pour les réseaux ad hoc sans fil. En plus de l'économie d'énergie, les modèles de contrôle de puissance ont également été utilisés pour améliorer la réutilisation spatiale du canal sans fil dans l'espace afin d'augmenter le débit du réseau.

L'utilisation du niveau de puissance maximal entraîne des interférences excessives et réduit les possibilités de réutilisation spatiale du canal, ce qui augmente la consommation d'énergie et limite considérablement le débit global [63]. En outre, un niveau de puissance plus élevé entraîne un grand nombre de nœuds voisins en moyenne. Par conséquent, le coût de gestion des informations voisines augmente et cela peut également augmenter la consommation d'énergie de ces voisins lorsqu'ils participent aux activités de routage.

D'autre part, l'utilisation d'un faible niveau de puissance au niveau de chaque nœud permet de conserver plus d'énergie, d'augmenter la réutilisation spatiale du canal et de réduire les interférences radio. Cependant, cela peut entraîner une déconnexion du réseau [64]. Par conséquent, les niveaux de puissance des nœuds définissent la structure de connectivité ou la topologie du réseau. Cela signifie que le contrôle de la puissance d'émission peut être utilisé comme moyen pour contrôler la topologie du réseau.

Le contrôle de puissance ou de topologie consiste à adapter les portées et les puissances de transmission des nœuds afin d'assurer une consommation minimale d'énergies tout en gardant la connectivité du réseau. Il s'agit de trouver une portée de transmission optimale pour les nœuds du réseau, pouvant être commune ou pas, permettant d'optimiser l'énergie consommée lors des communications [65] [66]. Le contrôle de topologie vise à réduire la portée des nœuds, si possible, d'où à réduire les interférences et les collisions permettant ainsi une meilleure conservation d'énergies [67].

Plusieurs propositions existent pour assurer le contrôle de topologie et de puissance. Dans [68] [69] les nœuds transmettent RTS-CTS par une puissance maximale P_{max} mais

envoient les paquets de données et d'acquittement par une puissance minimale P_{min} . La puissance minimale nécessaire P_{min} varie avec la distance entre l'émetteur et le récepteur, et le niveau d'interférence côté récepteur. Cette technique est appelée le contrôle de puissance BASIC. Cependant, les auteurs de [70] [71] ont mentionné que ces schémas entraînaient une augmentation significative d'interférence provoquant des collisions au niveau du récepteur avec les paquets de données et au niveau de l'émetteur avec les paquets d'acquittement. Par conséquent, il en résulte une consommation d'énergie plus élevée que l'utilisation de la norme IEEE 802.11 sans contrôle de puissance de transmission.

Dans [70], les auteurs proposent un protocole PCM (Power Control MAC) qui fonctionne de manière similaire aux techniques de contrôle de puissance de base, sauf que le niveau de puissance est périodiquement augmenté de P_{min} à P_{max} pour une très courte période durant la transmission du paquet de données. PCM atteint un débit réseau comparable avec IEEE 802.11 et consomme moins d'énergie. Dans le même contexte, Les auteurs de [72] introduisent le concept du problème de contrôle de puissance et fournissent un protocole qui suggère qu'une faible puissance de transmission commune prolonge la durée de vie de la batterie des nœuds. La plupart des techniques de contrôle de puissance proposées semblent consommer moins d'énergie que la pure norme IEEE 802.11, mais elles génèrent un débit plus faible en raison des interférences causées par les nœuds cachés. Les auteurs dans [71] [73] proposent des solutions pour ces problèmes.

2.3.3.2 Conservation d'énergie au niveau routage

Les protocoles de routage traditionnels utilisent généralement les algorithmes du chemin le plus court (en termes de nombre de sauts) sans tenir compte le problème d'énergie. Cela entraîne souvent un épuisement rapide de l'énergie pour le petit sous-ensemble de nœuds du réseau qui connaît une forte charge de trafic. L'objectif principale de routage tenant compte de l'énergie est de trouver une route à haut rendement énergétique entre la source et la destination.

Ce type de routage est généralement basé sur deux objectifs principaux. Le premier objectif est de maximiser le temps jusqu'à ce qu'un nœud épuise l'énergie de sa batterie, la raison de cet objectif est de maximiser la durée de vie globale du réseau. Essentiellement, le principe de conception du routage tenant compte de la consommation d'énergie consiste à équilibrer également la dépense énergétique entre les nœuds mobiles pour prolonger la durée de vie du réseau, tout en conservant autant que possible la consommation énergétique globale. En d'autres termes, les protocoles de routage avec contraintes d'énergie essaient

d'équilibrer plutôt que d'économiser la consommation d'énergie. Cela nécessite de prendre en compte les ressources énergétiques disponibles aux nœuds et augmente considérablement la complexité de la sélection des routes optimales. Ceci se traduit par le fait de choisir le chemin garantissant la consommation d'énergie la plus faible ou encore de choisir le chemin passant par les nœuds intermédiaires ayant les batteries les plus chargées. Il faut aussi garantir une diminution de l'énergie consommée par la procédure de découverte des routes et ce en adoptant une technique efficace. Une autre technique pour diminuer la consommation de l'énergie consiste à optimiser le nombre de messages de contrôle engendrés par le protocole utilisé au niveau du routage.

Le deuxième objectif est de minimiser la puissance de transmission totale consommée par tous les nœuds du chemin. Par conséquent, il est probable que le nombre de sauts soit plus élevé que lorsqu'on utilise un protocole de routage conventionnel avec un nombre minimum de sauts.

Divers protocoles ont été implémentés pour assurer la conservation de l'énergie au niveau routage :

Dans [74] [75] [76] les auteurs présentent une étude pour chaque couche de protocole et définissent plusieurs métriques pour étudier les protocoles de routage prenant en considération le problème d'énergie.

Dans [77], les auteurs ont intégré la puissance de transmission comme paramètre dans le processus de routage afin de trouver une route efficace en termes d'énergie. Les auteurs montrent que le gain en énergie est lié essentiellement à deux facteurs-clés : la distance entre la source et la destination et la puissance de transmission (portée de transmission) : la conservation d'énergie devient importante avec la portée de transmission. Dans ce scénario, les auteurs considèrent un modèle de couche radio simpliste qui ne prend en compte que le phénomène d'affaiblissement. Ainsi, ils n'ont pas considéré le coût d'énergie consommé lors des retransmissions des paquets en raison des interférences générées par les nœuds. Ces interférences sont directement liées à la puissance de transmission.

Dans le même contexte, les auteurs de [78] proposent le protocole de routage MPTR (Minimum Total Transmission Power Routing), ce protocole choisit la route qui minimise la consommation d'énergie et privilégie les routes avec plus de sauts afin de transmettre les paquets avec des puissances plus faibles et donc de diminuer l'énergie moyenne consommée d'un nœud, même si cela implique plus de nœuds dans la route. Par contre, les routes avec peu de sauts ayant des longues portées de transmission consomment plus d'énergie. En conséquence, plus de nœuds peuvent être impliqués dans la transmission des paquets in-

duisant une augmentation du délai du bout en bout d'une part et à plus de perte d'énergie le long du réseau d'autre part. Comme un plus grand nombre de nœuds sont impliqués dans le routage, tous les voisins des nœuds intermédiaires seront également affectés. L'inconvénient est que cette approche ne considère pas l'énergie restante des nœuds, ainsi elle ne prolonge pas la vie de chaque nœud.

L'un des inconvénients associés aux protocoles de routage mentionnés est la sur utilisation d'un petit sous-ensemble de nœuds de réseau. Les batteries de ces nœuds peuvent être épuisées rapidement, ce qui peut entraîner une partition du réseau. Plusieurs solutions ont été proposées pour utiliser l'énergie des nœuds d'une manière plus équilibrée afin que le trafic soit acheminé à travers les nœuds qui ont suffisamment d'énergie restante [79] [80] [81]. Ces protocoles de routage utilisent la capacité des batteries comme métrique pour le choix des routes.

Dans ce contexte, MBCR (Minimum Battery Cost Routing) [80] considère que la capacité restante de la batterie reflète mieux la durée de vie d'un nœud et choisit l'itinéraire qui maximise la capacité restante de la batterie. L'avantage de ce protocole est qu'il protège les nœuds contre l'épuisement et qu'il garantit le choix du meilleur chemin dans le cas où les nœuds présentent le même coût. Son inconvénient par contre est qu'un chemin contenant un nœud avec une capacité faible peut quand même être choisi.

Le protocole CMMBCR (Conditional Max-Min Battery Cost Routing) [80] a été proposé pour limiter la capacité restante minimale d'un ensemble de routes après il applique alors MTPR. Le CMMBCR prend en compte à la fois la consommation totale d'énergie de transmission des routes et la puissance restante des nœuds. Cela garantira le choix d'une route dont la capacité restante minimale est supérieure à une certaine limite et minimisera ainsi la consommation d'énergie.

Aussi, l'utilisation des paquets de contrôle consomme une quantité non négligeable d'énergie, plusieurs travaux ont proposé des protocoles de routage dans lesquels la réduction de ces paquets est le challenge afin de réduire la consommation d'énergie [25].

Les protocoles hiérarchiques visent à diviser les nœuds de réseau se forme de groupes où cluster chaque cluster est piloté par un chef afin d'effectuer une agrégation et une réduction des données échangées et par la suite d'économiser l'énergie.

Un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux Ad-hoc, nommé CBRP (Cluster Based Routing Protocol), est proposé dans [25]. Quatre états possibles des nœuds sont définis. Au départ, tous les nœuds sont en état isolé. Ensuite, en échangeant des paquets

de contrôle, chaque nœud maintient une table de voisinages contenant des informations sur ses nœuds voisins. Le nombre de voisins est choisi comme une métrique pour sélectionner le chef de groupe ou cluster head. Le chef de groupe construit son groupe composé de ses voisins à un saut (la distance entre deux nœuds dans le même groupe est égale à deux sauts). Enfin, un nœud qui appartient à deux groupes joue le rôle de passerelle permettant aux chefs des groupes de communiquer ensemble. Le reste des nœuds est de type membre.

Low-energy adaptive clustering hierarchy (LEACH) [82] est l'un des algorithmes de routage hiérarchique les plus populaires pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs en fonction de la puissance du signal reçu et d'utiliser des chefs de clusters locaux comme routeurs vers les autres nœuds de réseau. Cela permettra d'économiser l'énergie puisque les transmissions des paquets ne seront effectuées que par les chefs de cluster et non par tous les nœuds de réseau. Le nombre optimal de chefs de cluster est estimé à 5% du nombre total de nœuds. Tous les traitements de données tels que la fusion et l'agrégation sont locaux au cluster. Les chefs de cluster se changent de façon aléatoire dans le temps afin d'équilibrer la dissipation d'énergie des nœuds.

Dans [83], les auteurs proposent de prendre en compte le taux d'erreur sur le lien radio dans le routage, vu qu'un taux d'erreur élevé nécessite une retransmission qui coûte cher en énergie.

2.3.3.3 Gestion d'énergie

Les approches de contrôle de la puissance de transmission et de routage avec contrainte d'énergie envisagent de réduire le coût de la communication des nœuds mobiles pendant les périodes actives. Il a été observé que dans les réseaux ad hoc, la consommation d'énergie ne reflète pas toujours une communication active dans le réseau [84]. Les nœuds de réseau souffrent d'un autre problème c'est l'écoute passive de canal qui consomme une quantité considérable d'énergie. En principe, un nœud qui n'envoie ou qui ne reçoit pas de données devrait être en état de veille. Cependant, un nœud peut avoir transmis des données pour d'autres nœuds. Par conséquent, tous les nœuds sont en mode écoute. C'est pour cela qu'il est important de réduire ces coûts indirects [85]. Par ailleurs, la gestion d'énergie vise à mettre judicieusement l'interface sans fil d'un nœud dans un état d'inactivité ou de veille. La couche MAC est conçue pour identifier certains nœuds qui ne sont pas concernés par la transmission des données et de changer leur état en mode veille.

Les approches proposées à ce niveau définissent un mode veille durant lequel un nœud limite son activité réseau afin de conserver son énergie.

L'un des mécanismes de référence pour la conservation d'énergie dans les réseaux sans fil est PSM (Power Saving Mode) proposé par la norme IEEE 802.11 [86]. Du point de vue consommation d'énergie, un nœud peut avoir trois états. Il peut être en réception, émission, ou en mode d'écoute, et chaque mode a un niveau d'énergie dissipatrice.

Les auteurs de [85] proposent un protocole qui utilise les informations de la couche réseau pour piloter la couche MAC supportant le mode actif et veille. Dans le premier mode, l'interface radio est toujours allumée et opérationnelle. La transition du mode actif au mode veille est déterminée par un temporisateur et la communication ne sera possible qu'après la transition du nœud en mode actif. L'arrivée des messages de couche réseau (c'est-à-dire des messages de réponse d'acheminement dans des protocoles de routage réactif ou des messages d'établissements de chemin dans une communication orientée connexion) déclenche une transition vers le mode actif et rafraîchit le temporisateur. Tant que les messages de données arrivent, le temporisateur est rafraîchi et le nœud reste en mode actif. L'expiration du temporisateur indique que le trafic n'est plus attendu et que le nœud peut revenir au mode économie d'énergie (mode veille). L'inconvénient de ce protocole est que le temporisateur ne prend pas en compte le débit réel de données qui traversent le nœud en mode actif et cela nécessite le support de la couche d'application.

Ravi et Kashwan [87] ont proposé un algorithme de protocole de routage réactif, appelé EASRP (Energy-Aware Span Routing Protocol) qui utilise deux modèles de réduction d'énergie tels que Span et l'algorithme « Adaptive Fidelity Energy Conservation Algorithm » (AFECA). Le protocole optimise la consommation d'énergie par l'utilisation d'un circuit matériel appelé RAS (Remote Activated Switch) pour activer les nœuds qui sont en mode veille. Cette approche montre certaines limitations comme le fait qu'elle ne traite pas les différentes incertitudes liées aux informations du réseau.

Dans le protocole Geographical Gdaptive Fdelity (GAF) [88] Les nœuds peuvent être dans l'un des trois états, sommeil, Découverte ou actif. Au début, un nœud est dans l'état de découverte et échange des messages de découverte, y compris les ID de grille, pour trouver d'autres nœuds dans la même grille. Un nœud devient maître s'il n'entend aucun message de découverte pendant une période de temps donnée. Si plus d'un nœud peut devenir un maître, celui qui a la plus longue durée de vie prévue devient le maître et gère le processus de routage pour ce carré de la grille.

D'autres propositions [89] se basent sur une architecture à deux canaux radio assurant une conservation de l'énergie à travers la mise en veille d'un premier canal et l'utilisation du second à une puissance minimale pour réveiller un voisin spécifique ou pour écouter périodiquement le canal.

2.4 Conclusion

Étant donné que la majorité des appareils de communication mobile sont alimentés par des batteries, l'efficacité énergétique dans les réseaux mobiles ad hoc est devenue une contrainte majeure pour les MANET. Ces dernières années, plusieurs approches ont été proposées afin de réduire les sources de gaspillage d'énergie. Dans ce chapitre, après avoir présenté le modèle de consommation et les facteurs de surconsommation d'énergie, nous nous sommes concentrés sur les principaux travaux de la littérature qui ont traité le problème de l'énergie dans les réseaux ad hoc. Plusieurs propositions et approches ont été faites, que nous pouvons classer en trois niveaux : le contrôle de puissance de transmission, la gestion d'énergie (la technique veille/active) et le routage orienté conservation d'énergie. La plupart des travaux de conservation de l'énergie se concentrent sur la minimisation de l'énergie consommée par un nœud lors de la communication et sur la maximisation de la durée de vie des nœuds et du réseau. En effet, la plupart des travaux de recherche sont focalisés sur un des niveaux cités. Seulement quelques travaux ont abordé le problème et ont intégré plusieurs niveaux dans leurs solutions.

Après avoir fait une analyse sur les solutions proposées pour résoudre le problème de l'énergie, nous présentons dans le prochain chapitre, une étude qui montre l'impact de l'énergie sur la performance de réseaux. Cette étude nous mènera à proposer une nouvelle solution pour faire face au problème de l'énergie dans les réseaux Manet.

Comparaison entre les protocoles de routage en termes d'énergie

Sommaire

3.1	Introduction	49
3.2	Méthodologie	50
3.3	Indicateurs de mesure des performances réseaux	52
3.3.1	Charge des parquets de contrôle (NRL)	52
3.3.2	Taux de livraison des paquets avec succès (PDR)	52
3.3.3	Energie consommée	52
3.3.4	Délai moyen de bout en bout (Avg-End-to-End delay)	53
3.4	Model de consommation d'énergie	53
3.5	Paramètres de simulation	54
3.6	Résultats	55
3.7	Conclusion	65

3.1 Introduction

Le réseau mobile Adhoc est un type de réseau auto-organisé et auto-configurable, très utile lorsqu'il n'est pas économiquement pratique ou physiquement possible de fournir une infrastructure de réseau câblé (scénarios de champs de bataille, catastrophes naturelles, réseaux opportunistes, etc.) et de gérer les défaillances de nœuds.

Dans ce type de réseau, chaque nœud mobile fonctionne en tant qu'hôte et également en tant que routeur en transférant des paquets pour d'autres nœuds mobiles du réseau qui ne se trouvent pas dans une plage de transmission sans fil directe avec le nœud source.

Ainsi, chaque nœud participe au processus de routage, qui lui permet de découvrir des chemins multi-sauts à travers le réseau vers tout autre nœud. Les protocoles de routage tentent de satisfaire diverses propriétés telles que : l'utilisation efficace de la bande passante, l'implémentation distribuée, l'optimisation du débit, la convergence rapide des itinéraires et l'absence de boucles.

Un aspect important non traité dans ces protocoles est l'efficacité énergétique puisque les hôtes mobiles sont alimentés par une batterie dont l'utilisation efficace de l'énergie est un facteur clé du réseau ad hoc. Lorsqu'un nœud épuise son énergie disponible, il cesse de fonctionner et le manque d'hôtes mobiles peut entraîner un partitionnement du réseau, et affecter ainsi les performances de communication globales.

De nombreuses études ont été menées sur la comparaison des performances des protocoles de routage ad-hoc en termes de débit, de délai et taux de paquets délivrés, mais seules quelques études ont évalué la consommation énergétique de ces protocoles de routage.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un état de l'art sur le problème de l'énergie dans différents niveaux de consommation d'énergie ainsi que les solutions proposées. Dans cette thèse nous allons essayer de se concentrer sur le problème de l'énergie au niveau routage. Pour cela, ce chapitre présente un examen du comportement de la consommation d'énergie de quatre protocoles de routage (AODV, DSR, DSDV, OLSR) à l'aide du simulateur NS2 (Network Simulator 2) [90].

Dans un premier temps nous allons étudier la consommation d'énergie en modifiant certains paramètres de réseau comme par exemple la densité de réseaux, le taux de transfert, le nombre de connexions, etc. Cette étude a pour objectif de vérifier, si ces paramètres ont un impact sur la consommation d'énergie. Ensuite dans la deuxième partie, nous nous intéresserons uniquement au protocole AODV et nous allons voir l'impact de l'énergie sur les métriques de qualité de service comme le taux de paquets délivrés, le taux de paquets de contrôle, le nombre de paquets supprimés.

3.2 Méthodologie

L'objectif global de ce travail était de mesurer et de comparer le comportement de consommation d'énergie des quatre protocoles de routage analysés. la méthodologie de base utilisée consiste d'abord à sélectionner un ensemble de paramètres ou de facteurs qui ont un impact sur les réseaux MANET. Puis à évaluer le réseau en faisant varier les

paramètres sélectionnés.

Les paramètres sélectionnés sont :

1. Le nombre de nœuds dans le réseau,
2. Le nombre de sources de trafic,
3. La vitesse de mobilité des nœuds dans le réseau,
4. Le temp de pause.
5. Le taux d'envoi.

Dans la première partie nous essayons de définir un scénario de base et d'étudier le comportement des quatre protocoles en termes d'énergie. Ce scénario de base a été choisi principalement pour permettre des comparaisons directes avec les scénarios qui suivent. Les autres scénarios sont fondés sur le scénario de base avec un changement des facteurs cités ci-dessus. Voici une petite présentation sur les scénarios proposés :

- Scénario de base : les paramètres sélectionnés dans le scénario de base sont décrits dans la partie 5.
- Scénario N° 1 : on va conserver les paramètres du scénario de base avec modification de la densité du réseau, nous avons choisi les nombres de nœuds suivants : 5 pour une faible densité, 20 pour une densité moyenne, et 40 pour une grande densité du réseau.
- Scénario N° 2 : on va conserver les paramètres du scénario de base avec modification du nombre de sources de trafic.
- Scénario N° 3 : on va conserver les paramètres de scénario de base avec modification de la vitesse de mobilité des nœuds. 0m/s (0Km/h) qui reflète un réseau statique, 1m/s (3.6 Km/h) qui reflète la marche d'un être humain, 5m/s (18Km/h) qui reflète la vitesse d'un cycliste, 15m/s (55KM/h) qui reflète la vitesse de voiture au milieu urbain. Et 25m/s (90Km/h) qui reflète la vitesse d'une voiture.
- Scénario N° 4 : on va conserver les paramètres du scénario de base avec modification du temps de pause (0s, 50s, 100s, 150s). Lorsqu'un nœud atteint le point cible, il attend le temps de pause puis, en sélectionnant un autre point cible aléatoire, il se déplace à nouveau.
- Scénario N° 5 : on va conserver les paramètres du scénario de base avec modification dans le taux d'envoi de paquets.

Dans la deuxième partie, nous nous focaliserons sur le protocole de routage AODV et nous étudierons son comportement lorsqu'il y a des nœuds dans le réseau qui ont une quan-

tité d'énergie insuffisante. Pour cela on va analyser le protocole en termes de la charge des parquets de contrôle, du taux de livraison des paquets de données, des paquets supprimés et d'énergie consommée. La partie suivante décrit tous ces paramètres.

3.3 Indicateurs de mesure des performances réseaux

Pour évaluer la performance du réseau, nous avons utilisé les indicateurs de performance les plus importants, cités ci-dessous :

3.3.1 Charge des parquets de contrôle (NRL)

Représente le nombre des paquets de contrôle envoyés dans le réseau par rapport au nombre total des paquets de données reçus par les nœuds de destination. Cet indicateur reflète l'efficacité des protocoles de routage en termes de paquets de contrôle générés.

$$NRL = \frac{\text{nombre des paquets de contrôle envoyés}}{\text{nombre total des paquets de données reçus}} \quad (3.1)$$

3.3.2 Taux de livraison des paquets avec succès (PDR)

Représente le nombre total des paquets de données reçus avec succès par rapport au nombre total des paquets de données transmis dans le réseau. Ce facteur nous donne une idée sur la fiabilité du protocole en termes de garanties de livraison des paquets.

$$PDR = \frac{\text{nombre total des paquets de données reçus}}{\text{nombre total des paquets de données transmis}} \quad (3.2)$$

3.3.3 Énergie consommée

Représente la moyenne d'énergie consommée par chaque nœud dans le réseau.

$$Energie = \frac{\sum energie_i}{\text{nombre de noeuds}} \quad (3.3)$$

3.3.4 Délai moyen de bout en bout (Avg-End-to-End delay)

Correspond au délai moyen passé par un paquet de données entre le moment où il a été envoyé par une source et celui où il a été livré à la destination. Cela inclut tous les retards éventuels causés par les files d'attente et de latence lors du processus de découverte de route, les retards de retransmission au niveau de la couche MAC, la propagation et les temps de transfert.

3.4 Model de consommation d'énergie

Une extension de simulateur NS-2 comprend un modèle énergétique qui informe les nœuds de leur niveau d'énergie instantané. Pour bénéficier de ce modèle, il faut définir trois paramètres : l'énergie initiale, la puissance de transmission (txPower) et la puissance de réception (rxPower).

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent, de nombreuses raisons conduisent à la consommation d'énergie, généralement dûe à la transmission et à la réception des paquets de données ou au contrôle. Dans notre étude de simulation, nous avons fixé ces paramètres comme indiqué dans le TABLEAU 3.1.

Et la consommation d'énergie moyenne (AEC) est calculée par le rapport de l'énergie totale consommée par chaque nœud sur nombre total de nœuds.

$$ARC = \frac{\sum_{i=0}^n \{(\text{initial energy}(x_i) - \text{remain energy}(x_i))\}}{\text{number of node}} \quad (3.4)$$

Paramètre	Valeur
Energie initial	100
Idle Power	712e-6
Energie de reception	0.3
Energie de transmessio	0.6
Sleep Power	144e-9

Tableau 3.1: Paramètres d'énergie

3.5 Paramètres de simulation

L'objectif de ces simulations est d'étudier et de quantifier les effets de différents facteurs et leurs interactions sur la consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc. Chaque exécution du simulateur prend comme entrée un fichier de scénario qui décrit le comportement de chaque nœud. Par conséquent, pour évaluer la performance d'un facteur particulier, nous considérons 20 simulations aléatoires et chaque point dans les graphs présente la moyenne des résultats de ces 20 simulations.

La simulation des scénarios proposés a été performée par le simulateur (Network Simulator 2) version 2.35. NS2 est un simulateur à événement discret, orienté objet, développé par le groupe de recherche du projet VINT de l'Université Carnegie Mellon [91] qui comprend : la mobilité des nœuds, une couche physique réaliste comprenant un modèle de propagation radio, des interfaces réseau radio et le support IEEE 802.11 et le protocole de contrôle d'accès (MAC) utilisant la fonction de coordination distribuée (DCF). NS2 c'est le simulateur de réseaux le plus utilisé par la communauté des chercheurs dans les Mantes, il inclut l'implémentation complète des protocoles de routage DSR, AODV, DSDV et TORA qui sont en cours d'amélioration, les différents groupes de recherche proposent régulièrement de nouvelles versions améliorées pouvant être insérées automatiquement dans NS2. Annex1 donne une présentation de ce simulateur.

Dans nos simulations, nous avons considéré un nombre de nœud entre 10 et 50 dans une superficie carrée de 500x500m. La vitesse des nœuds est définie entre 5m/s (18km/h) et 25m/s (90KM/h).

Nous avons aussi utilisé l'objet de mobilité « random waypoint » pour définir le modèle de mobilité. Il s'agit d'un modèle simple et largement accepté pour décrire les comportements de mobilité plus réaliste. Lorsque le nœud atteint sa destination, il s'arrête pendant (0-160) secondes, puis choisit une nouvelle destination au hasard avec un temps de simu-

lation égale à 200s.

Un modèle de trafic aléatoire avec des connexions UDP entre les nœuds mobiles est utilisé. La position des nœuds, la connexion entre les paires des nœuds et le temps de démarrage de transfert des données sont générées aléatoirement dans chaque simulation [92]. Le résumé de ces paramètres et d'autres est présenté dans le tableau 3.2.

Paramètre	Valeur
Surface de topologie	500 x 500 m
Nombre de noeuds	10-50
Model de mobilité	Random Waypoint
Couche MAC	IEEE 802.11 DCF
Modèle de propagation	Two Ray Ground
Type d'antenne	Omni directional
Temps de simulation (s)	200
Le temps de pause (s)	0-40-80-120-160
Type de trafic	CBR
Taille du paquet (B)	512
Énergie initiale (Goule)	100
Taux de paquets (packet/sec)	1-2-3-4-5
Nombre de connexion	5-25

Tableau 3.2: Paramètres de simulation

3.6 Résultats

Les figures suivantes présentent la quantité d'énergie consommée par la couche réseau par rapport aux autres couches dans les quatre protocoles de routage AODV, DSR, DSDV et OLSR. À partir de ces graphes, on remarque que l'énergie consommée par les protocoles réactifs (AODV, DSR) est faible par rapport à celle consommée dans les protocoles proactifs (OLSR, DSDV) surtout dans le cas d'absence de mobilité. Ce comportement est justifié par la méthode de recherche de route dans ces protocoles. Avec les protocoles réactifs dans un réseau statique sans mobilité, les nœuds de réseau recherchent et créent des itinéraires lorsqu'ils en ont besoin. Est ces routes restent valides tant qu'il n'y a pas de changement dans la topologie du réseau, ou expiration du délai de la route ou défaillance d'un nœud parmi les nœuds intermédiaires.

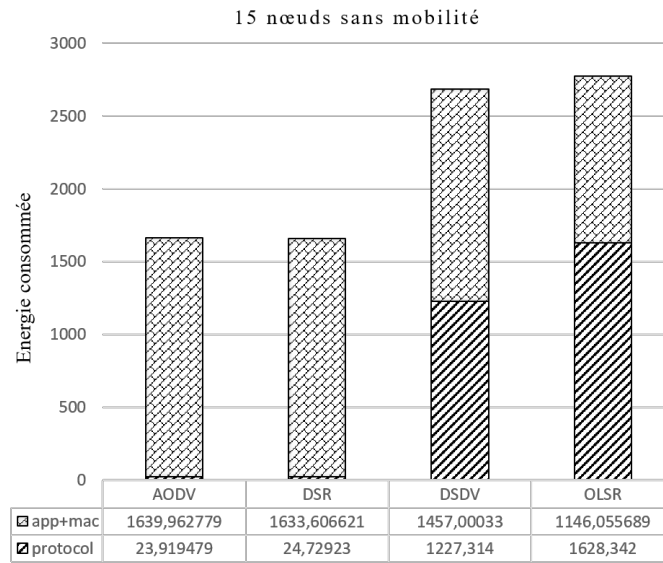


FIGURE 3.1: Scénario avec 15 nœuds et sans mobilité

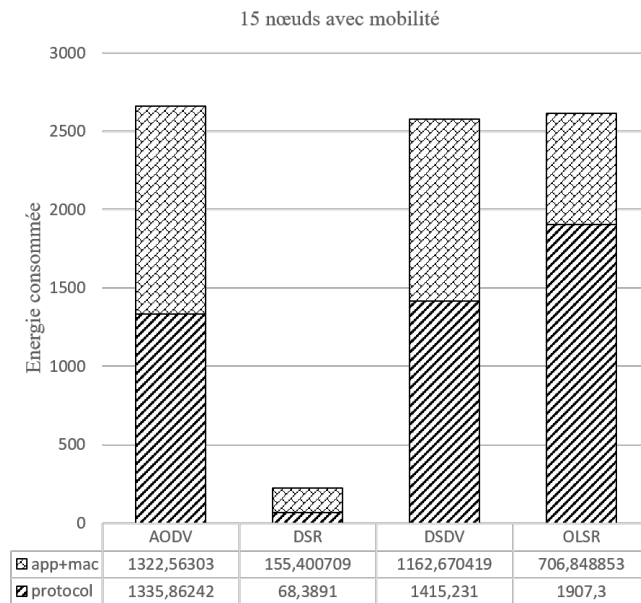


FIGURE 3.2: Scénario avec 15 nœuds et avec mobilité

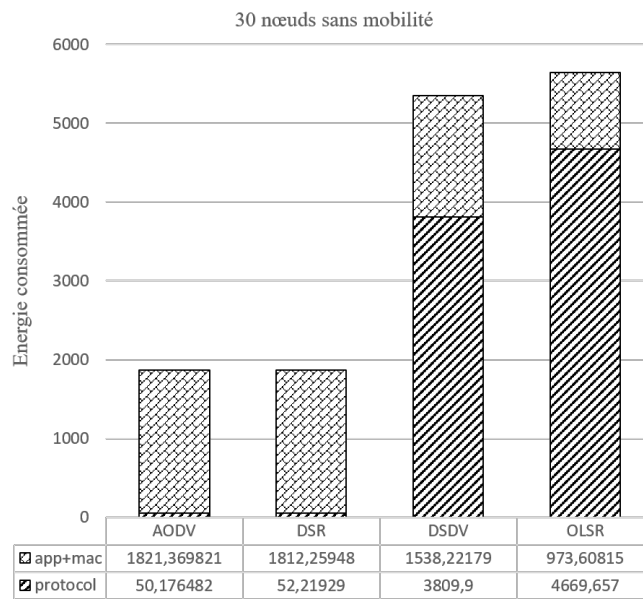


FIGURE 3.3: Scenario avec 30 noeuds et sans mobilité

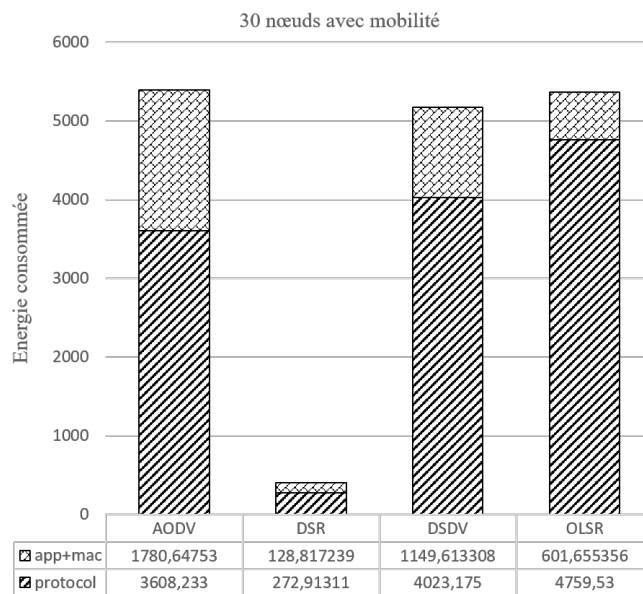


FIGURE 3.4: Scenario avec 30 noeuds et avec mobilité

Dans les protocoles proactifs les nœuds tentent toujours d'envoyer périodiquement des paquets de contrôles pour actualiser et mettre à jour leurs tables de routages, ce qui mène à une surconsommation d'énergie. Figure 3.1 et Figure 3.3 montrent la quantité d'énergie

consommée par les protocoles de routage dans un réseau dans lequel ses nœuds sont fixes (ne se déplacent pas). On remarque que les protocoles AODV et DSR consomment une quantité de 1,43%, 1,49% respectivement avec 15 nœuds et 2,68% et 2,80% avec 30 nœuds. Par contre dans les protocoles proactifs on trouve que DSDV et OLSR consomment 45,72% et 58,69%, respectivement avec 15 nœuds et 71,23% et 82,74% avec 30 nœuds. Dans Figure 3.2 et Figure 3.4 on a gardé les mêmes paramètres de simulation sauf qu'on a ajouté la mobilité aux nœuds du réseau. On remarque que les protocoles proactifs conservent le même comportement avec une petite augmentation dans l'énergie consommée par le protocole de routage. D'autre part, dans les protocoles réactifs, il y a une augmentation considérable dans l'énergie consommée. La raison principale de cette consommation c'est la procédure de reconstruction des routes perdues à cause de la mobilité des nœuds dans le réseau. Malgré cette augmentation, les protocoles réactifs, en général, consomment moins que les protocoles proactifs dans tous les scénarios.

Figure 3.5 présente la variation de la consommation d'énergie au niveau de la couche réseau dans les quatre protocoles de routage en modifiant le nombre de nœuds dans le réseau. On peut remarquer généralement que le protocole OLSR consomme plus d'énergie que les autres protocoles, suivi par DSDV et les protocoles AODV et DSR, sachant qu'AODV et DSR consomment presque la même quantité d'énergie dans tous les scénarios. Ainsi que la consommation d'énergie par la couche réseau dans les quatre protocoles augmente relativement avec le nombre de nœuds de réseau. Cette augmentation est due à la rediffusion des paquets de contrôle de la part des nœuds ajoutés.

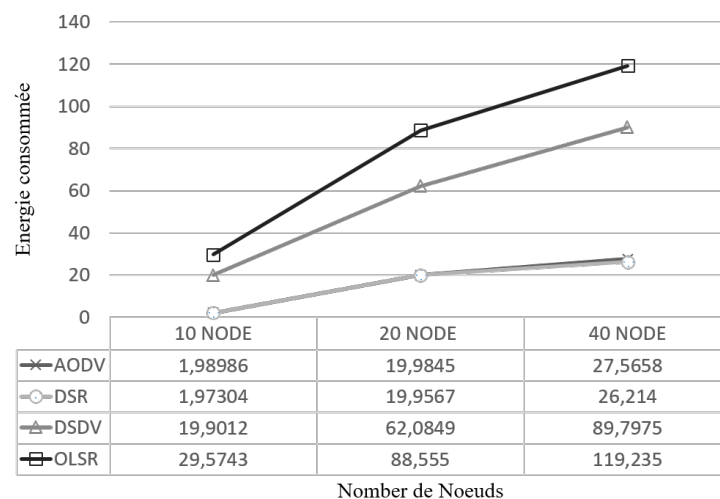


FIGURE 3.5: Consommation d'énergie par rapport à la densité du réseau

Figure 3.6 présente la variation de la consommation d'énergie par rapport au nombre de connexions dans le réseau. Dans ce scénario on a conservé les mêmes paramètres du scénario précédent en fixant le nombre de nœuds à 40. A partir de cette figure on remarque que les protocoles proactifs consomment plus d'énergie que les protocoles réactifs lorsqu'il y a 5 connexions. Le protocole OLSR conserve le même comportement et consomme presque la même quantité d'énergie avec 20 et 40 connexions. Dans le protocole OLSR chaque nœud tente toujours de trouver au préalable une route vers n'importe quelle destination dans le réseau, c'est pour cela que l'augmentation de nombre de connexions n'affecte pas la performance de protocole, et par la suite la consommation d'énergie. Pour le protocole DSDV il consomme moins d'énergie lorsqu'on augmente le nombre de connexions.

Avec les protocoles réactifs on remarque une augmentation considérable de la consommation d'énergie lorsqu'on augmente le nombre de connexion de 5 à 15. Cette augmentation est justifiée par le processus de création des nouvelles routes dans les deux protocoles. Par contre lorsqu'on augmente le nombre de connexion de 15 à 30 on observe que les deux protocoles consomment la même quantité lorsqu'il y a seulement 15 connexions.

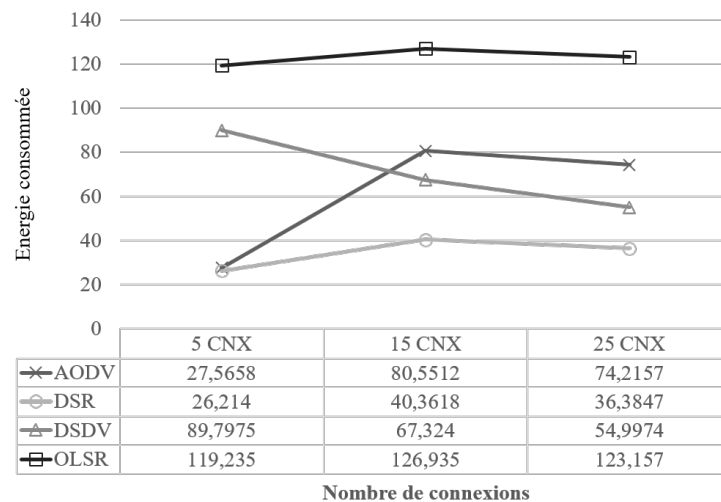


FIGURE 3.6: Consommation d'énergie par rapport au nombre de connexions

Figure 3.7 montre l'énergie moyenne consommée par rapport au taux d'envoi. On remarque que les protocoles réactifs (AODV, DSR) ont presque le même comportement lorsqu'on augmente le taux d'envoi de 1p/s à 8 p/s. et le protocole DSDV consomme plus d'énergie que les protocoles réactifs par une surconsommation de 334%, suivi par le protocole OLSR avec une moyenne de surconsommation de 455%. Tous les protocoles ont une surconsommation graduelle d'énergie lorsque on augmente le taux d'envoi.

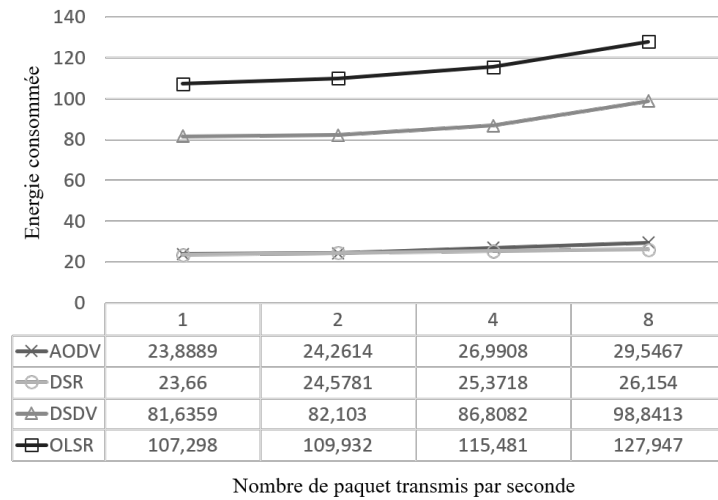


FIGURE 3.7: Energie moyenne consommée par rapport au taux d'envoi

La figure 3.8 présente la consommation d'énergie au niveau routage par chaque protocole en modifiant la vitesse de mobilité des nœuds du réseau. À partir de la figure on remarque, comme prévu que le protocole DSR consomme moins d'énergie que les autres protocoles, suivi par le protocole AODV, DSDV et OLSR.

Lorsque la mobilité des nœuds augmente de 1m/s à 5m/s, on remarque que la consommation augmente dans les protocoles réactifs surtout dans le protocole AODV par un pourcentage de 69%. Après il y a une légère augmentation de consommation avec 15 et 25 mètres par seconde. Tandis que dans les protocoles proactifs on remarque qu'il y a une sorte de stabilité dans la consommation d'énergie. Ces comportements s'expliquent par la nature des protocoles.

Dans les protocoles proactifs il y a toujours une mise à jour des routes, c'est pour cela que la mobilité n'a pas un grand effet sur les réseaux qui utilisent ce type de protocoles. Par contre dans les protocoles réactifs un nœud du réseau cherche une route seulement lorsqu'il a besoin d'envoyer des paquets. Cette route reste valide tant qu'elle n'est pas brisée, et dans les réseaux ad hoc, la mobilité représente la cause principale des ruptures des routes. Dans ce cas, le protocole est obligé de lancer le processus de réparation de route qui consomme une quantité substantielle d'énergie. Ce comportement justifie la surconsommation d'énergie dans les réseaux réactifs lorsque la mobilité augmente.

D'autre part, la figure 3.9 représente le taux de paquets livrés de chaque protocole dans les mêmes simulations de figure 3.8. Et comme la figure montre, les protocoles proactifs souffrent de la mobilité car le taux de livraison des paquets diminue lorsque la mobilité

augmente. Cependant les protocoles réactifs ont maintenu le même niveau de taux de paquets livrés dans les mêmes scénarios.

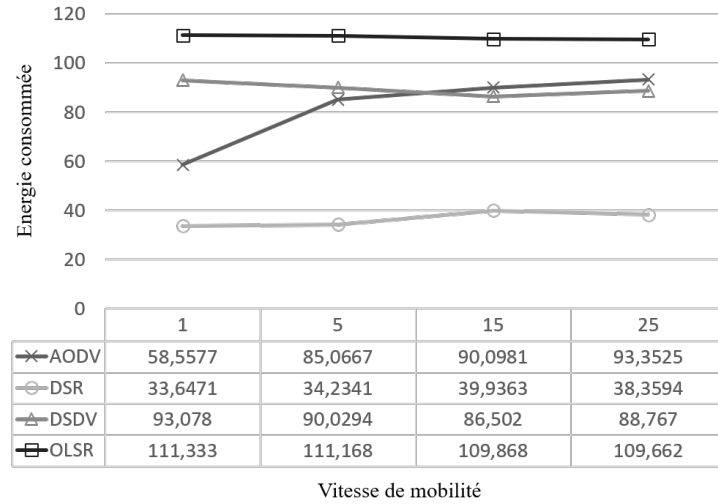


FIGURE 3.8: Consommation d'énergie par rapport la vitesse des nœuds (a)

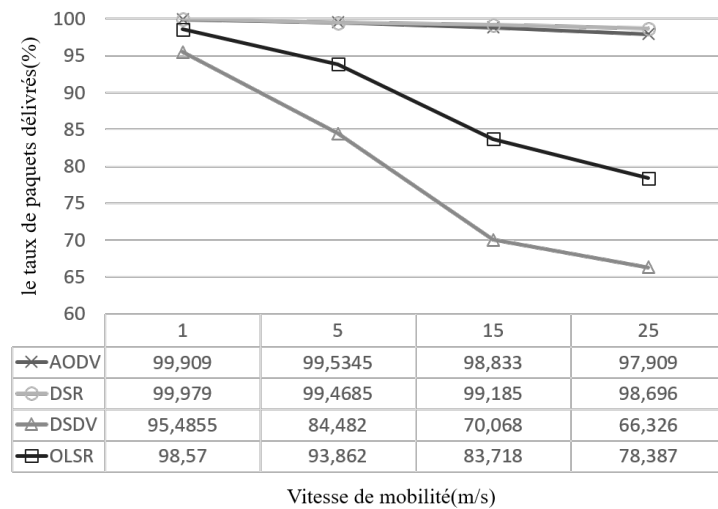


FIGURE 3.9: Taux de paquets délivrés par rapport la vitesse des nœuds (b)

Les simulations précédentes montrent que les protocoles réactifs consomment moins d'énergie que les protocoles proactifs dans tous les scénarios, ceci est dû au fait que ces derniers génèrent périodiquement un nombre de paquets de contrôle considérable, Ce qui augmente la quantité d'énergie consommée.

Dans le reste de ce rapport on va s'intéresser au protocole AODV en vue de son comportement soit au niveau de consommation d'énergie comme montré dans la partie précédente, Ou au niveau des autres métriques de qualité de service comme le taux de paquet livrée, débit, et etc. Du fait que plusieurs études comparatives qui ont été menées sur DSR et AODV démontrent que AODV surpasse DSR et spécialement dans un réseau dense ou très mobile [93].

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'impact de l'énergie des nœuds sur le réseau. Pour cela on va tester les performances de protocole AODV dans deux scénarios. Dans le premier scénario, tous les nœuds de réseau disposeront d'une quantité énergie suffisante. Et dans le deuxième scénario, nous insérerons dans le réseau des nœuds avec un niveau énergie faible pour voir l'impact généré sur les autres métriques (le taux de paquet de contrôle, le taux de paquet livré, le nombre de paquets supprimés et aussi sur l'énergie consommé) et également sur l'ensemble du réseau.

L'analyse comparative a été réalisée en faisant varier le nombre de connexions en utilisant le simulateur NS-2. Les simulations sont effectuées pour 50 nœuds où le taux de transmission est de 5 (paquet/s). La simulation est également effectuée dans un environnement dense et le nombre de connexions mobiles passe de 5 à 25 connexions. Le Tableau 2 présente les autres paramètres de simulation.

Les figures : figure 3.10, figure 3.11, figure 3.12, figure 3.13 présentent les résultats de simulation :

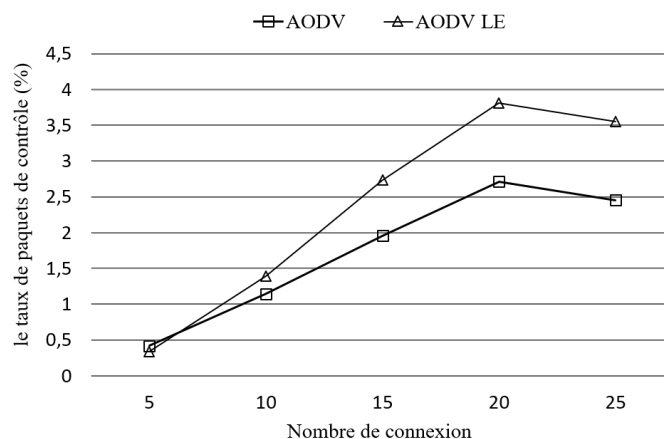


FIGURE 3.10: Taux de paquet de contrôle

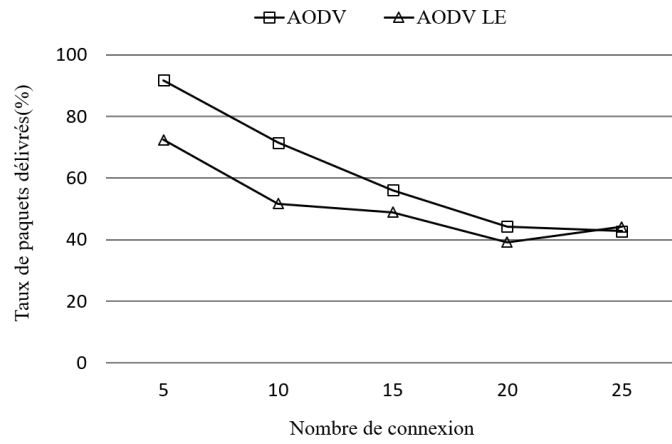


FIGURE 3.11: Taux de paquet délivré

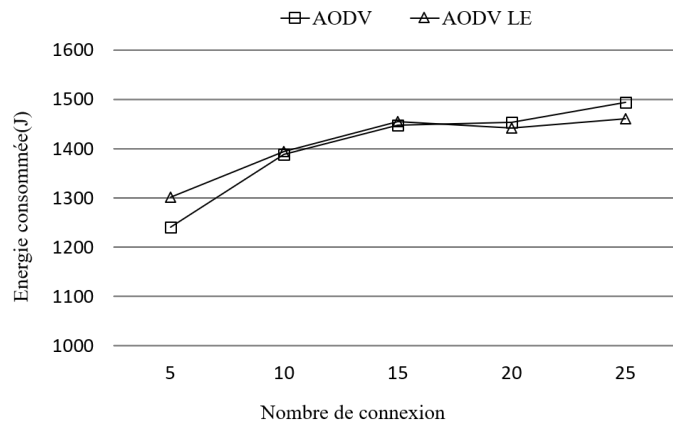


FIGURE 3.12: Energie consommée

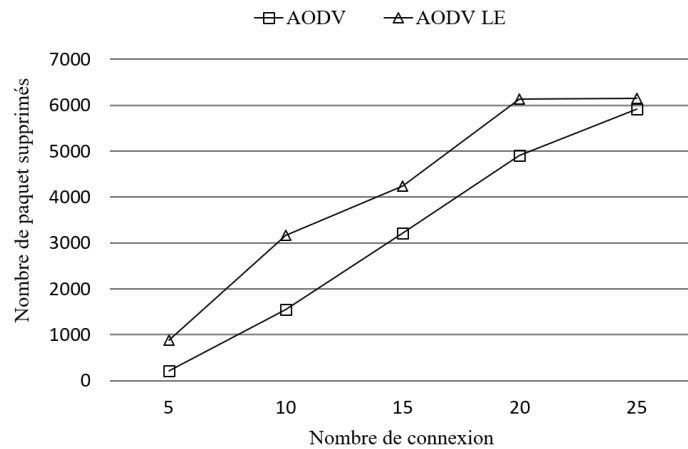


FIGURE 3.13: Taux de paquets supprimés

A partir de ces figures, on peut observer clairement que les différentes métriques du réseau, tel que le taux de paquets de routage, le taux de paquets livrés, la quantité d'énergie consommée et le nombre de paquets supprimés sont affectées dans le deuxième scénario dans laquelle on a inséré des nœuds avec une faible quantité d'énergie.

Le protocole AODV comme décrit dans les chapitres précédents, a un processus de recherche de route qui se base sur deux critères. Le premier est l'indice de fraîcheur de route (sequence number) et le deuxième représente le nombre de sauts. Cependant, cette technique s'est avérée moins pertinente, puisqu'il ne prend pas en considération aucune métrique de qualité de service.

Dans le deuxième scénario le protocole AODV, lors de la sélection des routes, choisit les routes qui ont un nombre de nœuds intermédiaires minimal. Ce qui induit généralement aux sélections des nœuds avec une faible quantité d'énergie. Ainsi, les itinéraires choisis auront une durée de vie courte ce qui conduit à l'interruption rapide de ces routes. Dans un réseau Ad hoc l'interruption des routes est très coûteuse surtout dans les protocoles réactifs, car le processus de construction des routes consomme une quantité non négligeable de ressources réseaux ce qui explique les résultats obtenus dans les figures ci-dessus.

3.7 Conclusion

Ce chapitre présente dans la première partie une comparaison de la consommation d'énergie des protocoles de routage réactifs (AODV, DSR) et proactifs (OLSR, DSDV) pour un réseau mobile ad-hoc, en prenant en compte le nombre de nœuds, le nombre de connexions, le taux de transmission et la vitesse de mobilité des nœuds. Dans les scénarios proposés, on a constaté que les protocoles réactifs sont plus efficaces que les protocoles proactifs en termes d'énergie, et plus particulièrement en cas de faible mobilité. Ces expériences montrent que DSR est efficace dans la plupart des scénarios où il consomme moins d'énergie, ce qui est dû au fait qu'il applique des caches de route et utilise le routage à source sans utiliser des transmissions périodiques, il utilise également la mise en cache et conserve plus d'une route pour chaque destination. Pour le protocole AODV il a presque le même comportement que DSR, mais dans un réseau mobile ou un trafic élevé le protocole AODV consomme plus d'énergie que DSR. D'autre part, le protocole OLSR est le protocole qui consomme le plus entre les protocoles traités. Cette consommation augmente avec la taille ou le trafic échangé dans le réseau. La raison de cette consommation est le coût de transmission périodique des messages de contrôles. De plus, le protocole DSDV souffre d'une charge de trafic élevée, mais il consomme quand même moins d'énergie qu'OLSR, parce qu'il utilise un message de contrôle court (faible surcharge) et un mécanisme de reroutage rapide. De ce fait, le type de protocole de routage affecte significativement la consommation d'énergie en raison des différents mécanismes utilisés pour envoyer et recevoir les paquets de routage.

Dans la deuxième partie on a étudié le comportement du réseau avec le protocole AODV lorsqu'on intègre des nœuds avec une faible quantité d'énergie. À partir des résultats obtenus, nous concluons que le réseau a été affecté sur plusieurs niveaux tels que le taux de paquets livré et aussi l'énergie consommée. Le problème principal derrière la diminution des performances du réseau réside dans la méthode de choix des routes. Parce que la qualité du nœud intermédiaire dans le chemin en termes d'énergie et stabilité n'est pas prise en compte. Par conséquent, cela pourrait avoir un effet négatif sur le réseau et en particulier lorsque le nombre de communications augmente.

Comme conclusion, les protocoles de routage utilisés actuellement dans MANET nécessitent plus d'améliorations, pour réduire l'énergie consommée et améliorer les métriques de qualité de service du réseau. Dans le chapitre suivant, nous présentons notre solution et les mécanismes mis en place pour surmonter le problème d'énergie pour une meilleure performance du réseau.

Optimisation de l'énergie consommée par le protocole de routage AODV dans MANET

Sommaire

4.1	Introduction	66
4.2	Ad hoc On demand Distance Vector (AODV)	67
4.2.1	Procédure de découverte de route	72
4.2.2	Procédure de Maintenance des routes	74
4.3	EQ-AODV : energy and QoS supported AODV	75
4.4	Présentation générale de protocole amélioré EE-AODV	76
4.4.1	Sélection de la route	80
4.4.2	Simulation	82
4.5	Conclusion	87

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une étude synthétique sur quatre protocoles de routage (AODV, DSR, DSDV et OLSR). Nous nous sommes intéressés, en particulier à l'étude de la consommation énergétique qui constitue l'axe de recherche de cette thèse, et à sa relation avec les différentes métriques de qualité de service. Ainsi dans le présent chapitre, nous allons proposer un mécanisme de routage basé sur le taux de consommation d'énergie des nœuds qui sera utilisé pour améliorer le protocole de routage AODV dans les MANET. L'objectif est de résoudre le problème de la consommation d'énergie afin de prolonger la connectivité du réseau. L'algorithme proposé permet une consommation

d'énergie équitable lors de l'établissement d'une route en construisant des routes moins saturées que les autres. Dans ce but, les informations de congestion sont obtenues à partir d'un coût calculé dépendant principalement du taux de la consommation d'énergie, qui mesure la rapidité avec laquelle un nœud consomme son énergie résiduelle. Les caractéristiques principales de mécanisme utilisé résident dans son efficacité et son aptitude à être appliqué à d'autres protocoles de routage.

Nous évaluons par simulations la performance du protocole de routage AODV modifié, y compris les améliorations apportées, et nous le comparons avec le protocole de routage AODV de base et le protocole EQ-AODV proposés dans [94]. Les résultats montrent que le protocole proposé offre des performances supérieures à l'AODV de base. En effet, il réduit de plus de 20% de la consommation totale d'énergie et diminue le délai moyen, en particulier pour les réseaux à forte charge, tout en assurant un bon taux de distribution des paquets. De plus, la simplicité du mécanisme permet sa mise en œuvre avec une complexité très réduite.

4.2 Ad hoc On demand Distance Vector (AODV)

AODV [95] est un protocole de routage conçu par Charles E. Perkins et Elizabeth M. Royer et spécifié dans le RFC 3561 [96]. C'est un protocole basé sur le principe des vecteurs de distance et qui appartient à la famille des protocoles réactifs.

Le protocole AODV fournit un service complètement orienté vers le principe de la route à la demande, c'est-à-dire les nœuds ne s'échangent pas périodiquement leur table de routage, ainsi qu'ils ne maintiennent pas d'information de routage. De plus, un nœud ne doit pas découvrir et maintenir les routes vers un autre nœud tant qu'il n'a pas établi une demande de connexion.

Le protocole est basé sur un établissement dynamique des routes par les nœuds intermédiaires. Ce système est efficace pour des réseaux avec un grand nombre de nœud. Afin de maintenir l'information de routage la plus récente entre deux nœuds, le protocole AODV comme DSDV utilise le concept de « destination sequence number » pour assurer une utilisation efficace de la bande passante (en minimisant la quantité d'information de contrôle sur le réseau), une réactivité aux changements de topologie et de se prévenir contre les boucles dans le réseau.

Le protocole AODV utilise deux principaux mécanismes "découverte de route" et "main-

tenance de route", en plus du routage " nœud par nœud " et construit les routes par l'emploi d'un cycle de requête "route request/route reply".

Dans cette thèse, nous nous intéressons au fonctionnement de protocole AODV, pour cela nous détaillons quelques principaux éléments nécessaires à la compréhension de ce protocole, ainsi que les deux mécanismes pour créer une route.

• La table de routage

Le protocole AODV construit dans chaque nœud de réseau Adhoc une table de routage contenant les informations nécessaires pour l'acheminement des paquets. Dans chaque entrée de la table, on trouve l'adresse des voisins actifs par lesquels les paquets transitent pour atteindre une certaine destination.

Il existe un paramètre qui définit le temps pour lequel un voisin est considéré actif, `active_timeout`. Cette information est maintenue à jour pour que le nœud source soit prévenu si une route considérée comme active se casse.

Une route est dite active si elle est utilisée par un voisin actif. On définit dans la table le temps de validité d'une route. Il correspond au temps où elle sera gardée en cache lorsqu'elle n'est pas utilisée.

De même, un timer est associé à la route de retour et détermine la durée de vie de ce chemin. Une fois le temps écoulé, cette entrée est supprimée. Ce temps de vie dépend de la taille du réseau ad hoc. Chaque nœud maintient donc sa table de routage qui contient les entrées suivantes :

- **Adresse destination** : l'adresse de noeud de destination.
- **Saut suivant** : l'adresse de noeud de suivant.
- **Nombre de sauts** : le nombre de nœud nécessaire pour atteindre la destination
- **Numéro de séquence destination** : garantit qu'aucune boucle ne peut se former.
- **Voisin actif pour cette route** : voisin origine ou relais d'au moins un paquet pour la destination pendant un temps donné.
- **Temps d'expiration pour la route** : Durée de validité de route

A chaque fois qu'une entrée est utilisée pour transmettre des données, son temps d'expiration est réinitialisé. (Temps d'expiration = temps courant + active route time).

Le protocole AODV utilise un ensemble de paquets pour construire et faire la mise à jour la table de routage. Ci-dessous une présentation de format de quatre paquets (figure 4.1, figure 4.2, figure 4.3 et figure 4.4).

- **RREQ (Route Request) : Message de demande de route**

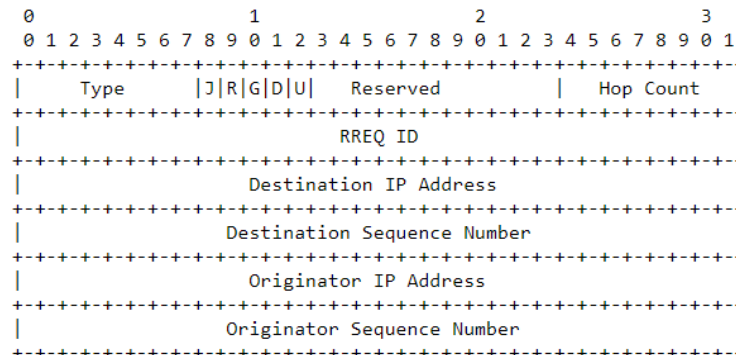


FIGURE 4.1: Format du message RREQ

- **Type (8 bits) :** ce champ indique le type de paquet, dans ce cas il prend la valeur 1.
 - **Flags (drapeaux) (5 bits) :** ce champ contient cinq flags (J, R, G, D, U) tel que ;
 - J (Join flag) et R (Repair flag) sont réservés pour le multicast ;
 - G (Gratuitous RREP flag) indique si un message RREP spécifique doit être envoyé à la destination dans le cas où un nœud intermédiaire possède un chemin à la destination.
 - D (Destination only flag) ce drapeau indique si seulement la destination qui doit répondre à la requête ou pas.
 - U (Unknown sequence number) indique le numéro de séquence de la destination est inconnu.
 - **Réserved (11 bits) :** initialisé à la valeur 0 et ignoré à la réception du message.
 - **Hop Count (8 bits) :** il contient le nombre de sauts parcourus par RREQ.
 - **RREQ ID :** il identifie la requête parmi les requêtes envoyées par la même source.
 - **Destination IP Address :** l'adresse IP de destination pour laquelle une route est désirée.
 - **Destination Séquence Number :** le dernier numéro de séquence reçu dans le passé par le créateur pour n'importe quelle route vers la destination.
 - **Originator IP Adress :** l'adresse IP de la source de la requête.
 - **Originator Sequence Number :** le nombre de séquence courant de la source contenue dans la table de routage de ce nœud s.
- **RREP (Route Reply) : Message de réponse à un RREQ**

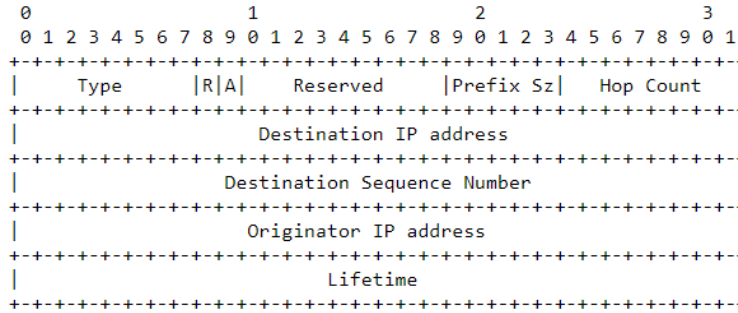


FIGURE 4.2: Format du message RREP

- **Type (8 bits)** : ce champ indique le type de paquet, dans ce cas il prend la valeur 2.
- **Flags (drapeaux) (2 bits)** : ce champ contient deux flags ;
 - R (Repair flag) : utilisé pour le multicast.
 - A (Acknowledgment required) : indique si la source doit envoyer un acquittement pour le message RREP.
- **Reserved (9 bits)** : initialisé à la valeur 0 et ignoré à la réception du message.
- **Préfix Sz(5 bits)** : si la valeur de ce champs est différente de zéro, ce dernier indique que le nœud prochain peut être utilisé pour chaque nœud demandant cette destination et qui possède la même valeur de Prefix Sz.
- **Hop Count (8 bits)** : il contient le nombre de sauts entre la source jusqu'à la destination.
- **Destination IP Address** : l'adresse IP de la destination du paquet RREQ.
- **Destination Sequence Number** : le numéro de séquence de la destination associé à cette route.
- **Originator IP Adress** : l'adresse IP du nœud qui crée la requête.
- **Lifetime** : le temps pour lequel chaque nœud qui reçoit RREP considère que la route est valide.
- **RERR (Route Error)** : Message qui signale la perte d'une route

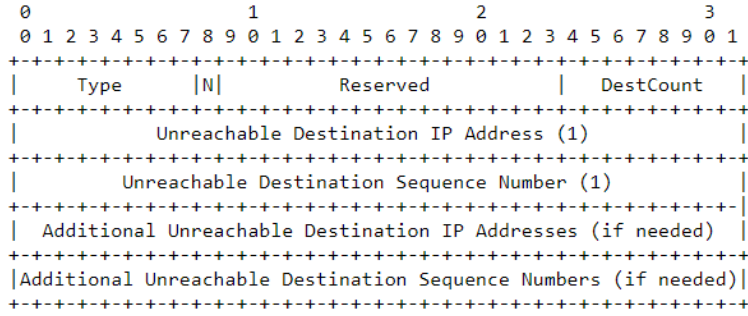


FIGURE 4.3: Format du message RERR

- **Type (8 bits)** : la valeur de ce champ prend 3 dans le message RERR.
- **Flag (1 bits)** : il contient un drapeau (N : No delete flag), celui-ci est indicatif lorsqu'un nœud est capable de réparer le lien, et informe les nœuds suivants qu'ils ne doivent pas supprimer le chemin.
- **Reserved (15 bits)** : initialisé à la valeur 0 et ignoré à la réception du message.
- **DestCount (8 bits)** : il indique le nombre de destinations inaccessibles incluses dans ce message. Ce champ doit être supérieur ou égal à un.
- **Unreachable Destination IP Address** : l'adresse IP des destinations inaccessibles pour la raison de cassure de lien.
- **Unreachable Destination Sequence Number** : le nombre de séquence de la liste des destinations inaccessibles qui se trouve dans le champ Unreachable Destination IP Address.
- **RREP-ACK (Route Reply Acknowledgment)**

Indique l'accusé de réception de RREP, est le message indiquant la prise en compte d'une autre route disponible.

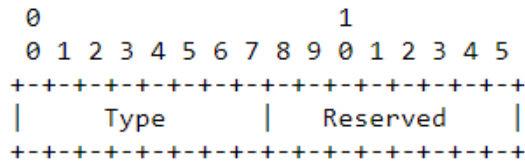


FIGURE 4.4: Format de message RREP-ACK

- **Le champ Type** : forcé à 4.
- **Reserved** : forcé à 0 ignoré à la réception.

4.2.1 Procédure de découverte de route

Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un paquet de données vers un autre nœud du réseau dans laquelle il n'a pas de route dans sa table de routage, il diffuse une requête de route RREQ (Route REQuest) (figure 4.5). Le paquet RREQ contient comme information l'identifiant de la requête, le nombre de saut parcourus, ainsi que le numéro de séquence de la source et numéro de séquence destination qui contient la dernière valeur connue du numéro de séquence, associé au nœud destination. Cette valeur est récupérée de la table de routage. Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient la valeur du numéro de séquence du nœud source. Après la diffusion du RREQ, la source attend le paquet réponse de route RREP (Route REPlay). Si ce dernier n'est pas reçu durant un certain temps défini, la source peut rediffuser une nouvelle fois une requête RREQ.

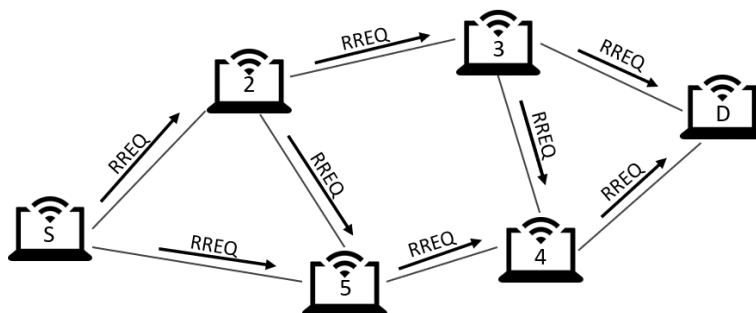


FIGURE 4.5: La propagation du paquet RREQ

Quand un nœud intermédiaire reçoit une requête RREQ, il doit vérifier qu'elle n'a pas été reçue précédemment. Si c'est le cas, alors elle est ignorée. Si le nœud intermédiaire ne connaît pas de route pour atteindre la destination demandée, alors les informations liées à la requête RREQ, dont le numéro de séquence de la source, sont sauvegardées localement afin de pouvoir faire suivre une éventuelle réponse RREP vers l'émetteur de la requête sur la route inverse. Cette information est utilisée pour construire le chemin inverse (figure 4.6), qui sera traversé par le paquet réponse de route de manière unicast, et cela signifie qu'AODV supporte seulement les liens symétriques.

Plus, si un message est reçu avec un numéro de séquence correspondant au nœud initiateur plus récent que le numéro de séquence enregistré dans ce cache, alors les informations sont mises à jour pour disposer d'une route inverse plus récente.

Lorsque la requête RREQ parvient à un nœud disposant d'une route active vers la desti-

nation, ou à la destination elle-même, une réponse RREP est envoyée sur la route inverse. Si le nœud recevant la requête n'est pas la destination, il vérifie d'abord que le numéro de séquence de sa route vers la destination est supérieur ou égal au numéro de séquence de destination inclus dans la requête RREQ et le drapeau ('D') " Destination only flag " n'est pas activé. Si c'est le cas, Une réponse RREP est émise sur la route inverse de celle parcourue par la requête RREQ, à destination de l'initiateur de RREQ.

Puisque le paquet RREP va être envoyé à la source, les nœuds appartenant au chemin de retour vont ajouter la route s'il n'y avait pas d'entrée dans leurs tables de routage. Ensuite, le nœud intermédiaire incrémente le nombre de saut dans RREP par un.

Sinon, le nœud intermédiaire compare le numéro de séquence de destination dans le message RREP avec son propre numéro de séquence de destination mémorisé pour l'adresse IP de destination. Lors de la comparaison, l'entrée existante est mise à jour uniquement dans les cas suivants :

- Le numéro de séquence dans la table de routage est marqué comme non valide dans l'entrée de la table de routage.
- Le numéro de séquence de destination dans la RREP est supérieur à la copie du numéro de séquence de destination enregistré dans la table de routage.
- Les deux numéros des séquences sont égaux, mais la route est marquée comme inactive, ou
- Les deux numéros de séquences sont égaux et le nombre de sauts qu'est dans RREP est plus petit que le nombre de sauts dans l'entrée de la table de routage.

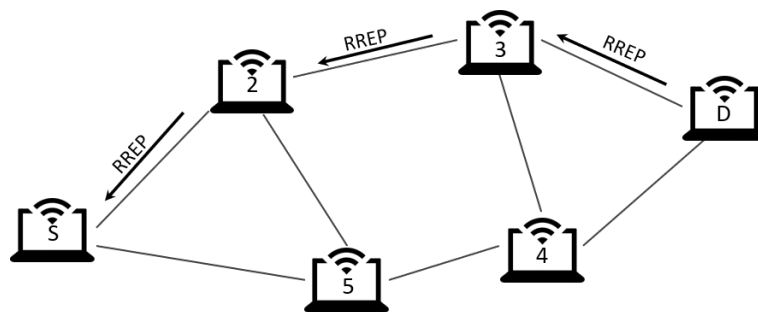


FIGURE 4.6: Chemin pris par RREP

Après que l'entrée de la table de routage vers la destination est créée ou mise à jour, le nœud va transférer le paquet RREP. Ensuite, le nœud initiateur de RREQ finit par recevoir la réponse RREP, et peut commencer à émettre les paquets de données vers la destination.

AODV propose une technique pour réduire le coût de la recherche de route en effectuant une recherche progressive. Initialement, la requête RREQ est diffusée à un nombre de sauts limité. Si la source ne reçoit aucune réponse après un délai d'attente déterminé, elle retransmet un autre message de recherche en augmentant le nombre de sauts. En cas de non réponse, cette procédure est répétée un nombre maximum de fois avant de déclarer que cette destination est injoignable.

4.2.2 Procédure de Maintenance des routes

AODV dans sa gestion de maintenance de route se base sur une technique qui permet d'assurer la bidirectionnalité des liens choisis. Pour vérifier si un lien est bidirectionnel, un message de contrôle périodique est utilisé pour cette fin c'est le message HELLO : ces messages sont diffusés à tous les voisins par un nœud pour annoncer son existence. Un message HELLO contient la liste de tous les voisins actifs de l'émetteur. Chaque nœud vérifie si il est présent dans un message HELLO reçu de son voisin, si oui le nœud peut considérer que le lien entre lui et le voisin est bidirectionnel.

En plus du fait que le message périodique HELLO est utilisé pour vérifier l'état du lien, il est également utilisé pour détecter la rupture des liens entre les nœuds. Si trois messages HELLO ne sont pas reçus consécutivement à partir d'un nœud voisin, le lien en question est considéré défaillant. Les défaillances des liens sont généralement dues à la mobilité des nœuds du réseau ad hoc. La mobilité des nœuds qui ne participent pas dans la route active, n'affectent pas la consistance des données de routage.

Si le nœud source se déplace pendant une session active, il peut réinitialiser la procédure de découverte de route pour établir une nouvelle route vers la destination. Lorsque la destination ou un nœud intermédiaire se déplace, le nœud qui détecte la rupture de lien génère et diffuse un paquet RERR (ROUTE ERROR) à tous nœuds sources concernés (figure 4.7). Une fois le paquet est reçu, la source peut initier le processus de découverte de routes dans l'éventualité où il a toujours des paquets de données dans sa queue à envoyer.

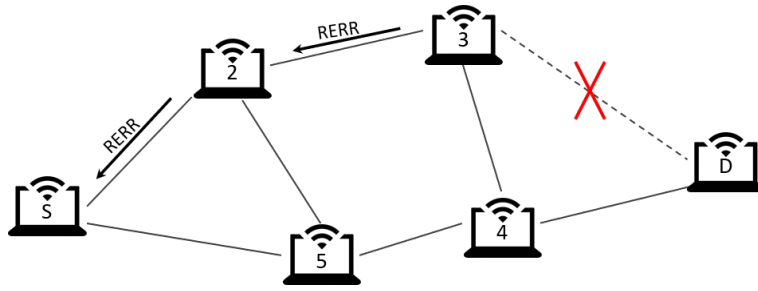


FIGURE 4.7: Exemple de Maintenance de route

Un autre volet de la maintenance est la suppression des routes inutilisées. Chaque route non utilisée pendant un certain temps sera supprimée de la table de routage, dans le cas contraire le protocole renouvellera la durée de la route, ce qui la maintiendra active.

4.3 EQ-AODV : energy and QoS supported AODV

EQ-AODV (energy and QoS supported AODV) [94] protocole qui offre de meilleures performances dans les WMSN (Wireless multimedia Sensor Network). EQ-AODV vise à améliorer le protocole AODV et à le rendre efficace pour les données multimédia dans les WMSN. Cette amélioration repose sur l'adaptation du processus de routage de l'AODV en fonction de deux paramètres. Le premier est l'énergie des capteurs appartenant à la route de routage et le deuxième paramètre est la nature des paquets reçus par ces capteurs. L'EQ-AODV distingue quatre classes de données manipulées par toutes les applications. Ces classes sont définies comme suit : C1 pour la vidéo, C2 pour l'audio, C3 pour l'image et C4 pour le texte. En plus de la priorité des données, la consommation d'énergie est un paramètre qui est également pris en compte. Ce paramètre est représenté sur le graphique de la figure 4.8 et sa valeur, représentée par le $HE_{j,j+1}$, est calculée comme suit :

$$HE_{j,j+1} = \int_j^{j+1} f(t) dt \quad (4.1)$$

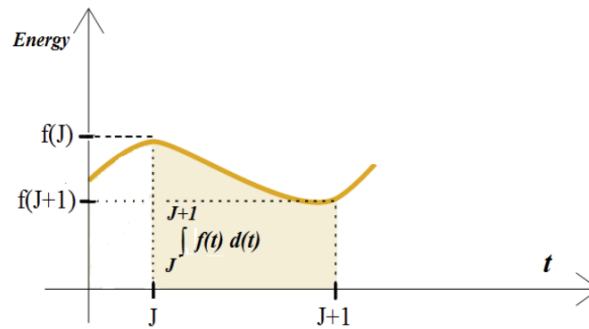


FIGURE 4.8: Représentation graphique de la fonction HE

Le protocole EQ-AODV donne des bons résultats par rapport au protocole AODV, aussi améliore les paramètres de QoS à savoir la charge du réseau et le délai de bout en bout, l'EQ-AODV a enregistré une amélioration importante également en termes de paramètres énergétiques qui sont l'énergie et la durée de vie des nœuds

4.4 Présentation générale de protocole amélioré EE-AODV

Dans l'AODV classique, les routes sont établies en fonction du nombre minimal de sauts pour prendre une décision sur la sélection des routes. En effet, la route est prise si elle a moins de nœuds intermédiaires. D'autres facteurs comme l'énergie résiduelle et la congestion de ces nœuds intermédiaires ne sont pas pris en compte dans le processus de sélection de la route. Dans le protocole EE-AODV nous essayons d'améliorer les performances du protocole de routage réactif AODV existant, en résolvant le problème causé par la mauvaise sélection des nœuds au moment de la construction de la route. Nous modifions la phase de recherche de route existante de l'AODV de manière à donner une performance supérieure à celle de l'AODV traditionnel.

Dans le protocole EE-AODV, nous considérons le taux de consommation d'énergie à chaque période au lieu de se limiter sur l'énergie résiduelle actuelle des nœuds. En fait, prendre en compte le taux de consommation d'énergie nous permet d'obtenir des informations sur l'énergie épuisée lors de la transmission et de la réception des paquets sans faire de calcul complexe de ces valeurs.

De plus, en utilisant le taux de consommation estimé et l'énergie résiduelle, nous calcu-

lons la durée de vie restante, et en supposant que le nœud continue à consommer l'énergie avec le même niveau pendant la durée de recherche de route7. De cette façon, nous donnons plus d'informations réelles sur le comportement de la durée de vie de la batterie dans chaque nœud. De plus, nous essayons de différencier les nœuds qui participent aux communications plus que d'autres nœuds même s'ils ont le même niveau d'énergie par la formule suivante.

$$ECR_i = \frac{RE_i(t_1) - RE_i(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

Pour calculer le taux de consommation d'énergie, nous calculons la différence de niveau d'énergie dans deux temps différents t_1 et t_2 et on divise la valeur obtenue sur cette période.

$RE_i(t)$: représente l'énergie résiduelle de nœud i dans le temps t et elle est calculée comme suite :

$$RE_i(t) = \max\{CE_i(t) - \sum_{j=1}^{j=Nbr-pkts} E_j(t), 0\} \quad (4.3)$$

$CE_i(t)$: représente l'énergie actuelle du nœud, et pour avoir une valeur précise de RE_i nous diminuons cette valeur par la valeur de l'énergie à consommer lors de l'envoi des paquets qui sont déjà dans la queue. Nbr-pkts représente le nombre de paquets restants et E_j représente l'énergie à consommer pour envoyer le paquet numéro j .

Ensuite on utilise la valeur obtenue du taux de consommation d'énergie avec l'énergie résiduelle, pour estimer la durée de vie de chaque nœud comme suit :

$$ERLT_i(t) = \frac{RE_i(t)}{ECR_i(t)} \quad (4.4)$$

$ERLT_i$: Durée de vie de chaque nœud i dans le temps t .

RE_i : Energie résiduelle de nœud i dans le temps t .

ECR_i : Taux de consommation d'énergie de nœud i dans le temps t .

Se baser seulement sur la durée de vie des nœuds dans la sélection des routes est

insuffisant, parce que la durée de vie résiduelle est une valeur estimative fondée sur le taux moyen de consommation d'énergie au cours des périodes précédentes du nœud. La durée de vie résiduelle des nœuds générée varie dans le temps en fonction du taux de consommation d'énergie. Donc Il y a des cas où les nœuds ont moins d'énergie mais génèrent une durée de vie plus longue parce qu'ils n'ont pas participé au processus de transfert de données au cours des périodes précédentes. Nous devons donc considérer leur niveau d'énergie comme un deuxième critère pour générer une autre valeur sur laquelle on va se baser pour sélectionner les nœuds qui participeront à l'établissement des routes. En utilisant la durée de vie résiduelle calculée dans 4.4, chaque nœud reçoit un paquet de demande de route RREQ doit calculer son poids par la formule suivante :

$$Poids_i(t) = ERLT_i * (EL_i/100) \quad (4.5)$$

Tel que $ERLT_i$ représente la durée de vie résiduelle du nœud i , et EL_i représente le niveau actuel de la batterie, la valeur de EL_i est calculée comme suit :

$$EL_i = (RE_i(t) * 100) / energie_Initiale \quad (4.6)$$

EL_i : représente l'énergie résiduelle de nœud i .

Pour intégrer la solution proposée au protocole AODV, nous avons conservé le même nombre de paquets de contrôle utilisés dans ce dernier, à l'exception que nous avons ajouté un champ dans le paquet de recherche de route (RREQ), et un autre pour stocker les adresses des nœuds traversés dans les deux paquets RREQ et le paquet de réponse de route (RREP) figure 4.9.

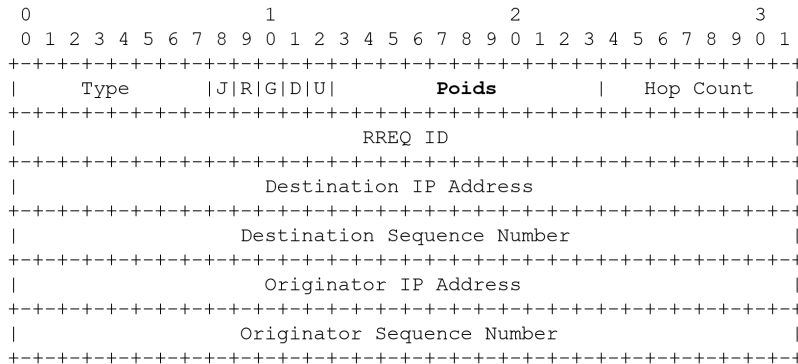


FIGURE 4.9: Nouveau format de paquet RREQ

Type	1(RREQ).
J R G D U	Join flag, Repair flag, Gratuitous RREP flag, Destination only flag, Unknown sequence number.
Poids	Représente la moyenne harmonique du poids des nœuds traversés.
Reserved	Envoyé en tant que 0 ; ignoré à la réception.
Hop Count	Le nombre de sauts de l'adresse IP de l'expéditeur au nœud qui traite la demande.
RREQ ID	Un numéro de séquence identifiant de manière unique le RREQ particulier lorsqu'il est utilisé conjointement avec l'adresse IP du nœud d'origine.
Destination IP Address	Adresse IP de la destination pour laquelle un itinéraire est souhaité.
Destination Sequence Number	Le dernier numéro de séquence reçu précédemment par l'initiateur pour toute route en direction de la destination.
Originator IP Address	Adresse IP du nœud origine de la demande de route.
Originator Sequence Number	Le numéro de séquence actuel à utiliser dans l'entrée de route pointant vers l'expéditeur de la demande de route.

Tableau 4.1: Champs de paquet de demande de route

Figure 4.9 montre le nouveau format du message RREQ dans lequel on a ajouté le champ poids. Ce champ va prendre comme valeur le cumul des poids des nœuds traversés

pour objectif de calculer le poids total de la route.

Comme AODV, dans le protocole EE-AODV lorsqu'un nœud veut envoyer des données à une destination vers laquelle il n'a pas de route, il lance le processus de découverte de route par la diffusion du paquet de demande de route (RREQ). Chaque nœud intermédiaire qui reçoit un paquet RREQ a le droit de l'ignorer ou de le rediffuser vers les autres voisins, selon la valeur de poids de ce nœud calculé par l'équation 4.5. Si cette dernière est supérieure à un seuil défini, le nœud va enregistrer et mettre à jour les informations du RREQ et le rediffuser vers ses voisins. Sinon, le nœud va supprimer le paquet RREQ pour objectif de ne pas participer dans la création de la route. Contrairement au protocole AODV les nœuds intermédiaires sont obligés de retransmettre tous les nouveaux paquets RREQ reçus.

De plus, cette nouvelle conception exige que les nœuds agissent sur tous les paquets RREQ, afin de sélectionner la meilleure route en termes de durée de vie et nombre de sauts parmi les routes disponibles.

Dans notre algorithme chaque nœud intermédiaire qui reçoit un paquet RREQ doit ajouter l'inverse de son poids calculé par 4.5 dans le champ poids du RREQ avant de le rediffuser. Ce processus se répète jusqu'à ce que la requête atteigne le nœud destinataire. Lorsque le nœud destinataire reçoit un message RREQ, il se base sur le champ poids pour calculer la moyenne harmonique des poids des nœuds traversés pour obtenir le poids de la route.

$$\text{Poids_route} = \frac{\text{nombre de saut}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{Poids}_i}} \quad (4.7)$$

4.4.1 Sélection de la route

Le fait de définir des routes sans considérer le nombre minimum de sauts, pourrait augmenter le temps de latence et éventuellement ajouter plus de paquets de contrôle. Par conséquent, le protocole EE-AODV devrait comprendre le concept d'économie d'énergie tout en réalisant un équilibre entre la prolongation de la durée de vie de la route et la qualité de la livraison des données en ce qui concerne le délai de bout en bout. À cette fin, les routes sont mises à jour par rapport à la différence dans le nombre de sauts entre la nouvelle route et la précédente. Cela signifie que la route est modifiée lorsqu'une nouvelle route valide possédant un poids supérieur est détectée et que la différence entre le nombre de sauts de la nouvelle et l'ancienne route ne dépasse pas un nombre donné, afin de ne

pas affecter les autres métriques de qualité de service comme le délai de bout en bout, dans notre solution, nous avons fixé ce nombre à 3 afin de prendre en considération le problème des nœuds exposés et cachés qui peut se produire en choisissant un chemin plus long avec une meilleure durée de vie résiduelle. Suivant cet algorithme le nœud destinataire sélectionne une route, ensuite il crée et envoie un paquet de réponse de route RREP vers la source, ce paquet RREP suit l'inverse du chemin traversé par le paquet RREQ pour atteindre le nœud source.

Une fois que la source reçoit le paquet RREP, elle peut commencer à émettre des paquets de données vers la destination. Si, ultérieurement, la source reçoit un RREP contenant un numéro de séquence supérieur ou égal à celui enregistré dans sa table de routage, elle mettra à jour son information de routage vers cette destination et commencera à utiliser la meilleure route. Une route est maintenue aussi longtemps qu'elle reste active, c'est-à-dire tant que des données circulent entre la source et la destination. Le lien expire quand il n'y a plus de données en transit au bout d'un délai appelé `ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT`. En cas de coupure du lien, le nœud d'extrémité émet un paquet RERR (Route Error) vers le nœud source pour le prévenir que la destination est désormais injoignable. Si le nœud source veut toujours obtenir une route vers cette destination, il doit recommencer le processus de découverte de route.

Algorithme 1 : Notre approche détaillée

Lorsqu'un nœud reçoit une demande de route par le paquet RREQ.

```

si (Nœud == Nœud_Intermédiaire) alors
  si (poids_Nœud > seuil) alors
    – Mettre à jour le champ Poids de paquet RREQ par l'ajout de son poids
    – Ajoute son adresse dans le champs d'adresses
    – Transmettre RREQ aux nœuds voisins
  sinon
    – Rejeter la session, et supprimer le RREQ

sinon si (Nœud == Nœud_de_destination ) alors
  si (RREQ_seqno ≥ rt_seqno ) alors
    – calcule la moyenne harmonique des poids des nœuds traversés
    – choisir la route optimale en prenant en considération le poids de la route
    – envoyer le paquet RREP vers le nœud source suivant la route stocké dans RREQ
  sinon
    – Rejeter la session, et supprimer le RREQ

```

4.4.2 Simulation

Pour évaluer les performances du protocole de routage proposé et réaliser une étude comparative avec le protocole de base AODV et le protocole EQ-AODV, nous utilisons le simulateur réseau NS-2 dans différentes conditions de densité réseau. Chaque exécution du simulateur prend en entrée un scénario qui décrit le comportement de chaque nœud. Par conséquent, pour évaluer la performance à un facteur particulier, nous considérons 20 simulations aléatoires pour générer 20 modèles de scénarios aléatoires. Chaque valeur dans le graphe représente la moyenne des valeurs de ces 20 sorties des performances mesurées. Un modèle de trafic aléatoire avec des connexions UDP entre les nœuds mobiles est utilisé dans la simulation. La position et les connexions entre les nœuds ainsi que l'heure de début des différentes connexions sont générées de manière aléatoire dans chaque simulation. Les autres paramètres de simulation sont présentés dans le tableau 4.2.

Paramètre	Valeur
Topology	1500x1500 m
Number of nodes	50,100
Mobility model	Random waypoint
MAC layer	IEEE 802.11 DCF
Propagation model	TwoRayGround
Antenna type	Omni directional
Transmission range(m)	20
Simulation time (s)	200
Traffic type	CBR
Packet size (B)	512
Traffic rate (packets/s)Q	5
Initial energy (Joule)	20-50
Mobile Connection	5-25
MAC Type	Mac/802_11
Interface queue type	Queue/DropTail/PriQueue
Maximum Speed of nodes	5 m/s

Tableau 4.2: Paramètres de simulation.

Nous analysons plusieurs métriques de qualité de service pour évaluer les performances de notre approche et comparons les résultats obtenus avec le protocole de base AODV et EQ-AODV. Les mesures suivantes sont utilisées pour évaluer les performances de notre protocole.

- **Taux de paquets délivrés ou PDR (Packet Delivery Ratio)** : c'est le pourcentage du nombre de paquets de données reçues par les destinations par rapport au nombre de paquets de données envoyés dans le réseau. Cela mesure la qualité du chemin découvert.

- **Charge de routage normalisée ou NRL (Normalized Control Overhead)** : c'est le pourcentage du nombre de paquets de contrôle envoyés dans le réseau par rapport au nombre de paquets de données livrés avec succès à toutes les destinations. Ceci mesure les frais généraux induits par le protocole.

- **Délai de bout en bout ou EED (End-to-End Delay)** : correspond au délai moyen passé pour un paquet de données entre le moment où il a été envoyé par une source et celui où il a été livré à la destination. Ceci mesure la performance du délai des flux de QoS.

- **Nombre des nœuds morts** : représente le nombre total de nœuds qui ont épuisé leurs énergies.

- **Consommation d'énergie** : La somme d'énergie consommée par tous les nœuds du réseau.

- **Nombre de paquets supprimés** : représente le nombre de paquets supprimés dans le réseau par différentes raisons telles que la collision.

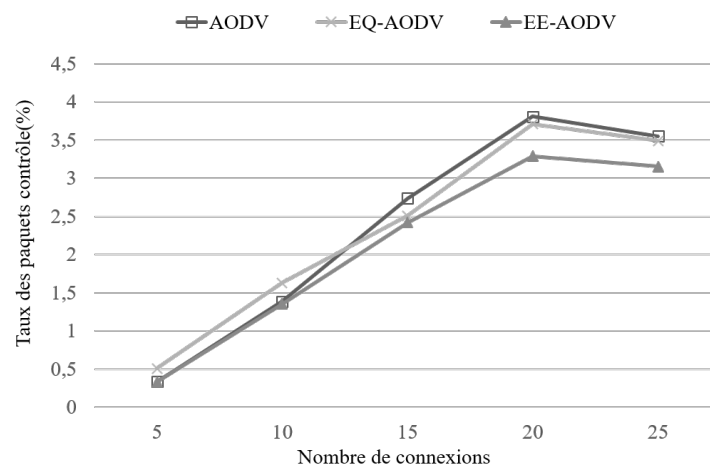


FIGURE 4.10: Taux de paquet de contrôle

Selon les résultats de la Figure 4.10, qui présente la surcharge du réseau (charge de routage normalisée) par rapport au nombre de connexions entre les différents nœuds. Nous

observons que le pourcentage des paquets de contrôle augmente relativement avec l'augmentation du nombre de connexions dans le réseau dans les trois protocoles. On observe aussi que la surcharge générée par le protocole EE-AODV est inférieure aux surcharges générées par les protocoles AODV et EQ-AODV respectivement par 9% et 20%. Cette amélioration est évidente lorsque le nombre de connexions est supérieur à 10.

Grâce à la technique de choix des routes suivie par notre protocole, les routes choisies sont plus pertinentes en termes de durée de vie et d'équilibrage de charge entre les nœuds intermédiaires, ce qui réduit le nombre de défaillances des routes et par la suite les processus de découverte des routes, comme elles prennent en considération la raison principale de la surcharge dans les réseaux mobiles.

Par contre le protocole AODV choisit les routes avec un nombre de saut minimal ce qui concentre la surcharge sur un nombre de noeuds spécifiques, et provoque l'épuisement de l'énergie de ces nœuds et par la suite oblige le protocole à ré-initier le processus de découverte de routes.

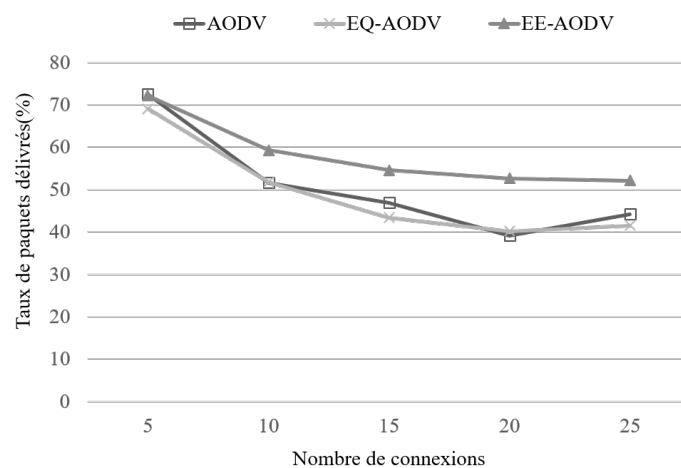


FIGURE 4.11: Taux de paquet délivré

La figure 4.11 présente le taux de paquets livrés par rapport au nombre de paquets envoyés. A partir de la figure, le taux de livraison des paquets est plus élevé dans le protocole EE-AODV par rapport à AODV et EQ-AODV, en particulier lorsque le nombre de connexions dépasse 10 connexions. Notre protocole livre en moyenne plus de 16% et 13% par rapport au EQ-AODV et AODV respectivement. Ces résultats montrent que le protocole EE-AODV offre plus d'avantages lorsque les communications augmentent.

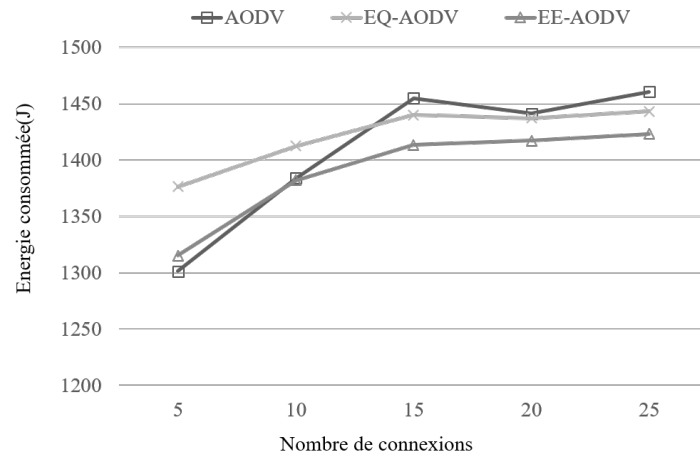


FIGURE 4.12: Energie consommé

La figure 4.12 montre la consommation d'énergie par rapport au nombre de connexions. La consommation d'énergie augmente respectivement avec l'augmentation du nombre de connexions dans tous les protocoles. Cependant, EE-AODV et EQ-AODV fonctionnent mieux que AODV spécialement lorsque le nombre de connexion dépasse 15 connexions. En effet, les deux protocoles évitent les nœuds intermédiaires qui ont un faible niveau d'énergie lors du processus de construction de la route vers le nœud de destination. De plus, le protocole EE-AODV contribue à réduire le nombre de défaillances des routes et élimine l'énergie perdue pendant le processus de découverte de la nouvelle route. Par conséquent, la durée de vie s'améliore significativement.

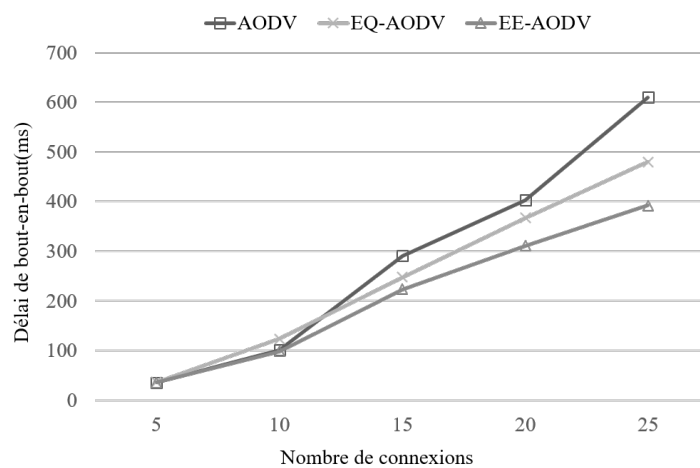


FIGURE 4.13: Délai de bout-en-bout

La figure 4.13 illustre le délai moyen de bout en bout. Les protocoles ont un délai de bout en bout plus long avec un nombre élevé de connexions. Principalement parce que les morts des nœuds intermédiaires augmentent le délai pour atteindre la destination. Mais EE-AODV réduit ce problème tout en offrant de meilleures performances que AODV et EQ-AODV, même en cas d'augmentation de la charge du trafic. En raison de la diminution du nombre de pannes de route, le temps perdu lors de la reconstruction de la route après la panne de la route est éliminé, ce qui explique la capacité de EE-AODV à réduire considérablement le délai de bout en bout par rapport à AODV et EQ-AODV.

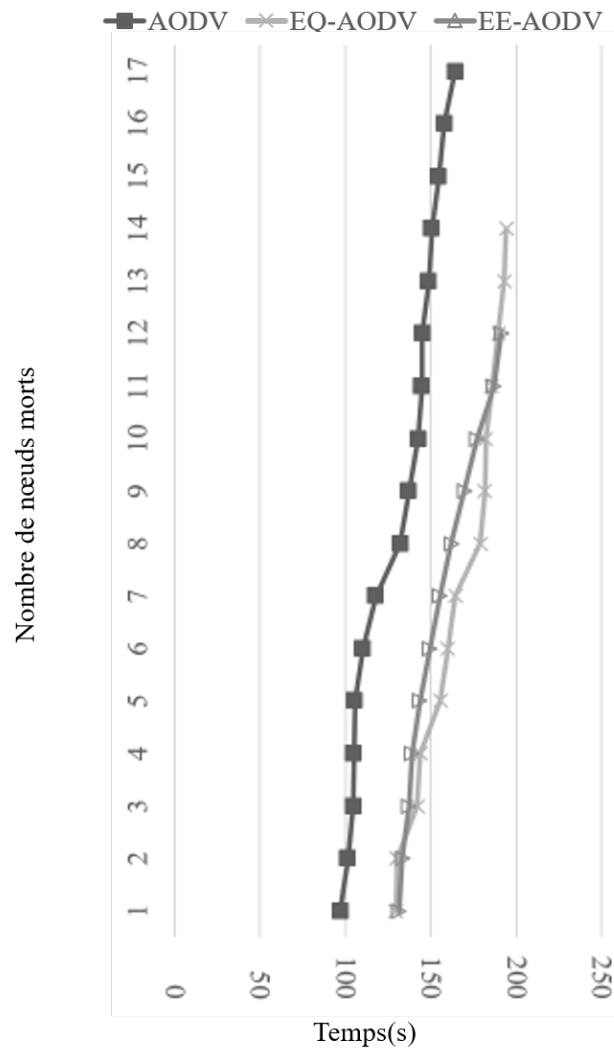


FIGURE 4.14: Nombre de nœuds morts

La figure 4.14 montre le nombre de nœuds qui meurent au cours du temps. Ce numéro

nous donne des informations sur la connectivité du réseau. Dans l'approche proposée, le premier nœud est mort à 131 secondes alors que, dans les protocoles EQ-AODV et AODV, le premier nœud était mort aux 129 et 97 secondes, respectivement. De plus, nous pouvons constater la mort d'environ 17 nœuds successivement dans l'AODV. Cependant, dans EE-AODV et EQ-AODV, nous avons moins de nœuds morts à la fin de la simulation et plus de temps entre la mort des nœuds et cela est dû à l'équilibrage de charge entre les nœuds par les protocoles EE-AODV et EQ-AODV, aussi par l'évitement des nœuds intermédiaires ayant une faible énergie restante lors de la construction de la route.

4.5 Conclusion

Dans un protocole de routage réactif, la stabilité de la route est très importante, car la rupture de route au moment de la transmission des données est très coûteuse. Par conséquent, le coût de la procédure de découverte d'itinéraire sera très élevé en termes du nombre de paquets de contrôle et également en termes d'énergie. Afin de minimiser ce problème dans le réseau mobile ad hoc, nous avons proposé dans ce chapitre un protocole de routage à haut rendement énergétique appelé EE-AODV, qui constitue une amélioration du protocole AODV. Nous utilisons l'énergie résiduelle ou la durée de vie et le nombre de sauts comme paramètres dans le processus de sélection de la route. Par conséquent, une route avec une durée de vie résiduelle élevée et un nombre de sauts minimum sera choisie. Les résultats de la simulation ont clairement montré des améliorations significatives de performance en termes de surcharge de contrôle normalisée, du taux de livraison de paquets de données et d'efficacité énergétique. De plus, le protocole proposé offre une meilleure durée de vie par rapport à AODV et EQ-AODV et en particulier dans un réseau dense comportant de nombreuses connexions. Tenant compte des avantages de la solution proposée dans ce chapitre, nous essaierons de développer cette solution en proposant un modèle de calcul de la stabilité des liaisons et en utilisant la logique floue pour résoudre les problèmes évoqués dans cette solution.

Maximisation et amélioration de la durée de vie de protocole AODV en utilisant la logique floue

Sommaire

5.1	Introduction	88
5.2	La logique floue	89
5.2.1	Définition	90
5.2.2	Fonction d'appartenance	92
5.2.3	Opérateurs	93
5.2.4	Fuzzification	94
5.2.5	Raisonnement en logique floue	95
5.2.6	Défuzzification	96
5.2.7	Système logique floue	96
5.3	Fuzzy AODV	97
5.4	Simulation et résultats	106
5.5	Conclusion	110

5.1 Introduction

Les protocoles de routage dans les réseaux MANET dépendent de plusieurs facteurs, notamment la topologie du réseau, la mobilité, la distance, la connectivité et le niveau d'énergie. Chaque nœud du réseau MANET fonctionne avec une puissance de batterie limitée. La nature dynamique et la faible présence de ressources dans ces réseaux exigent le développement d'un protocole de routage qui prenne en considération ces paramètres.

L'énergie est une ressource précieuse dans les réseaux mobiles ad-hoc, car la plupart des nœuds d'un tel réseau sont alimentés par une batterie qui ne peut pas être rechargée dans la plupart des cas. Afin de maintenir le réseau fonctionnel le plus longtemps possible, il convient de développer des algorithmes de routage efficaces en termes d'énergie.

Dans ce chapitre, nous proposons une amélioration du protocole de routage AODV en introduisant un système logique flou qui prend comme paramètres d'entrée trois métriques importantes ayant un impact direct sur la stabilité des routes, qui sont l'énergie moyenne de la route, la mobilité des nœuds et la distance entre deux nœuds communicants afin de sélectionner la route la plus stable.

Le choix du modèle mathématique de la logique floue était stratégique. Ce modèle permet d'imiter les décisions humaines, et permet de modéliser l'idée proposée de manière efficace et offre également une solution dont la complexité de mise en œuvre est assez faible.

5.2 La logique floue

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections de données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain [97]. Elle est basée sur la théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie classique des ensembles. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un état autre que vrai ou faux, la logique floue offre une flexibilité de raisonnement très précieuse qui permet de prendre en compte les imprécisions et les incertitudes. Cette logique permet d'imiter le raisonnement humain, car elle prend en compte des données imparfaites pour prendre des décisions, et à travers la formalisation du raisonnement en langage naturel. Et ça parmi les avantages de la logique floue car il permet de formaliser le raisonnement humain dans les règles par un langage naturel. Par exemple, voici quelques règles de conduite qu'un conducteur suit :

La logique floue présente ainsi de nombreuses applications concrètes. Nous citons à titre d'exemples : Aérospatial (Satellite altitude control, etc.), Automobile (Systèmes flous pouvant être entraînés pour le contrôle de la vitesse de ralenti, Systèmes routiers intelligents, etc.), affaire (Systèmes d'aide à la décision, etc.), la défense (Reconnaissance de cible sous-marine, Reconnaissance automatique de cibles d'images infrarouges thermiques, etc.), Électronique (Contrôle de l'exposition automatique dans les caméras vidéo, Systèmes de climatisation, etc.), Secteur industriel (Contrôle des stations d'épuration, etc.), Médi-

Si le feu est rouge	Si ma vitesse est élevée	et si le feu est proche....	Alors je freine fort.
Si le feu est rouge	si ma vitesse est faible	et si le feu est loin....	Alors je maintiens ma vitesse.
Si le feu est orange	si ma vitesse est moyenne	et si le feu est loin....	Alors je freine doucement
Si le feu est vert	si ma vitesse est faible	et si le feu est proche....	Alors j'accélère

Tableau 5.1: Exemple des règles de conduite

cal (Diagnostics de radiologie, Système d'aide au diagnostic médical, etc.) et Transport (Opération automatique de métro, Contrôle des horaires de train, etc.).

La logique floue est basée sur des solides fondements mathématiques et sur la théorie mathématique des ensembles flous. Pour cette raison, nous définirons formellement dans cette section la logique floue dans le but de donner un aperçu et une idée générale de la logique floue, sans être trop théorique.

5.2.1 Définition

En théorie des ensembles classiques, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble est booléenne. L'ensemble classique A est défini comme la liste des éléments, qui remplissent certaines conditions.

$$A = \{x/x \text{ répond à certaines conditions}\} \quad (5.1)$$

Les sous-ensembles flous permettent en revanche de connaître le degré d'appartenance d'un élément au sous-ensemble. Un sous-ensemble flou A d'un univers du discours U est caractérisé par une fonction d'appartenance :

$$\mu_A : U \longrightarrow [0, 1] \quad (5.2)$$

Où μ_A est le niveau ou degré d'appartenance d'un élément de l'univers de discours U dans le sous-ensemble flou. On peut définir aussi un sous-ensemble flou A dans l'univers du discours U comme suit :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (5.3)$$

Avec $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x dans A .

La figure 5.1 montre une représentation graphique d'un ensemble classique (à gauche) et d'un ensemble flou (à droite).

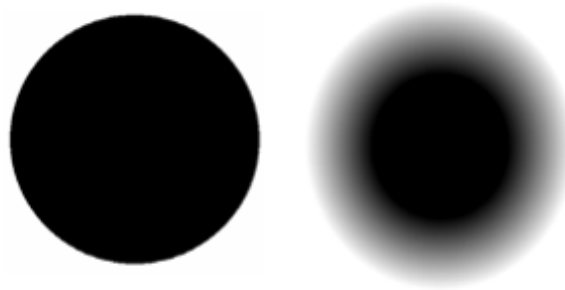


FIGURE 5.1: Ensemble classique (à gauche) et ensemble flou (à droite)

Afin de comprendre le concept d'ensemble flou, prenons comme exemple la note de la nourriture est-ce qu'elle délicieuse ou non. La figure 5.2 montre la différence entre un ensemble flou et un ensemble classique correspondant à la note délicieuse. Si la note égale à 8, cela signifie en logique classique que la nourriture n'est pas incluse dans le sous-ensemble «Délicieux». Par contre, dans la logique floue, la nourriture est délicieuse avec un degré d'appartenance de 50%.

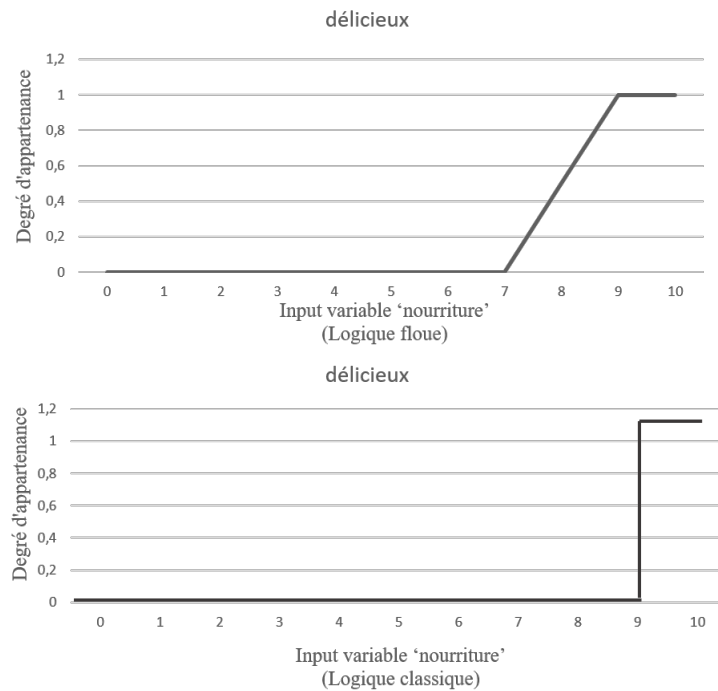


FIGURE 5.2: Fonction d'appartenance caractérisant le sous-ensemble "Délicieux" de la variable "nourriture"

5.2.2 Fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance est une fonction qui mappe les valeurs d'entrée des données dans la plage de $[0,1]$. Pour l'ensemble flou A et l'ensemble d'entrée X, la fonction d'appartenance floue peut être caractérisée comme suit :

$$\mu_A(x) : x \longrightarrow [0,1] \text{ pour } x \in X.$$

Les différentes fonctions d'appartenance utilisées dans FLS sont : triangulaire, trapézoïdale, sinusoïdale, gaussienne et sigmoïde. La sélection de la fonction d'appartenance dépend de la nature des données d'entrée.

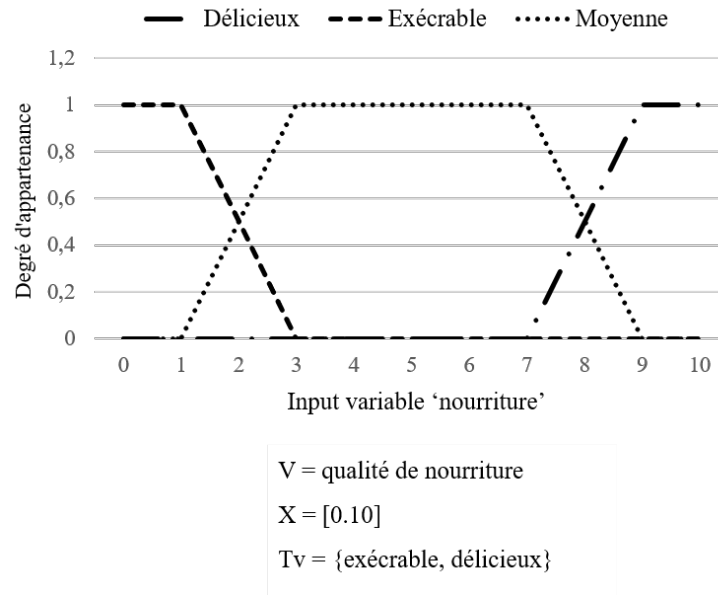


FIGURE 5.3: Fonction d'appartenance caractérisant les sous-ensembles "exécration" et "délicieux" de la variable "nourriture"

5.2.3 Opérateurs

Comme dans la théorie des ensembles classique (booléenne), la théorie des ensembles flous possède également des opérateurs permettant de manipuler facilement des ensembles flous. Voici quelques opérateurs de base parmi les plus utilisés :

Soit U l'univers du discours, A et B deux ensembles flous, μ_A et μ_B ses fonctions d'appartenances :

Conjonction : opérateur ET

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \forall x \in U \quad (5.4)$$

Disjonction : opérateur OU

$$\mu_{A \vee B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \forall x \in U \quad (5.5)$$

Négation : opérateur NON

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \forall x \in U \quad (5.6)$$

5.2.4 Fuzzification

Dans l'étape de fuzzification, les valeurs d'entrée nettes sont converties en fonctions des appartenances floues correspondantes. En d'autres termes, cette étape convertit une valeur réelle (par exemple, la taille d'une personne) en une valeur floue (par exemple, courte, moyenne ou grande), en utilisant l'univers du discours, des sous-ensembles flous et leurs fonctions d'appartenance. En prenant comme exemple, la qualité du service et la qualité de la nourriture, comme indiqué dans les figures 5.4 et 5.5. Si la qualité de service du restaurant est de 5/10, alors la fuzzification donnera la valeur floue «bon». Pour le deuxième exemple, si la qualité de la nourriture est de 9/10, alors la fuzzification donnera comme résultat la valeur floue « délicieux ».

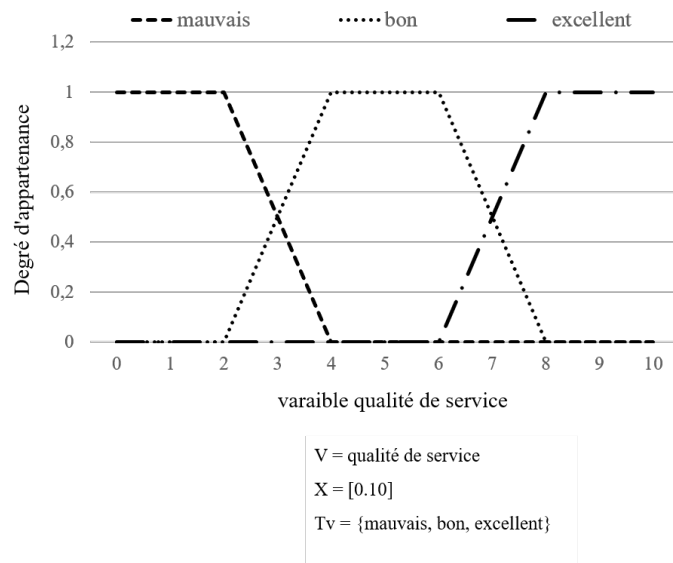


FIGURE 5.4: Variable linguistique "Qualité du service"

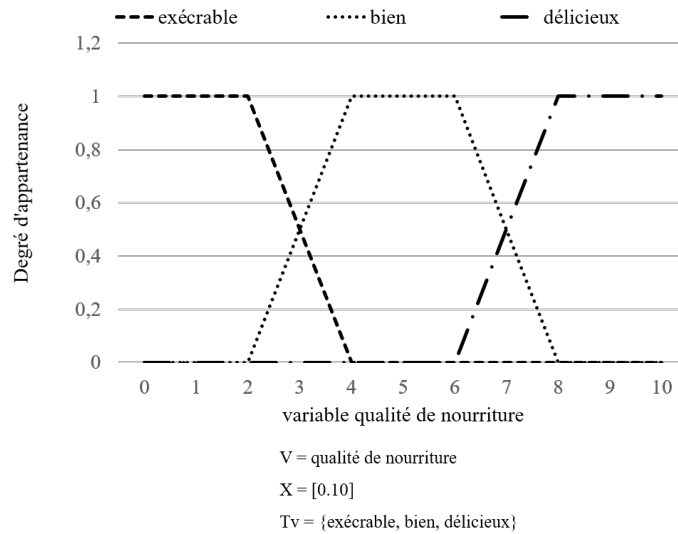


FIGURE 5.5: Variable linguistique "Qualité de la nourriture"

5.2.5 Raisonnement en logique floue

En logique classique, les raisonnements sont de la forme :

- Si p alors q .
- p vrai alors q vrai

Le raisonnement en logique floue, également appelé raisonnement approximatif, se base sur des règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les variables linguistiques.

Le raisonnement flou est l'étape qui exploite les valeurs floues de la fuzzification pour concevoir les règles floues exprimées en langage naturel. Cette étape permet de définir les règles floues de manière à concevoir le raisonnement souhaité (c'est-à-dire le raisonnement humain). De plus, les règles floues peuvent être définies manuellement en fonction des besoins. La figure 5.6 illustre un exemple de règle floue reliant la qualité du service et la qualité de la nourriture dans un restaurant avec le montant de pourboire associé. Les règles floues définies représentent la matrice des décisions, qui définit le raisonnement flou adopté. Ainsi, après la fuzzification, le raisonnement flou est appliqué via la matrice de décision, et une conclusion est générée (par exemple, pourboire est élevé). Et enfin, il ne reste que la conclusion, défuzzification.

Règle 1
SI (le service est excellent **ET** la nourriture est délicieuse) **ALORS** (le pourboire est élevé).
Règle 2
.....
Règle 3
.....

FIGURE 5.6: Format des règles floues

5.2.6 Défuzzification

La défuzzification est le processus de conversion de l'ensemble flou de sortie une valeur de sortie nette. Il existe des méthodes de défuzzification déjà définies comme le centre de gravité, la méthode de la moyenne pondérée, la moyenne des maxima et le plus petit du maximum. Dans le protocole proposé, le centre de gravité (COG) est utilisé. Cette méthode consiste à déterminer le COG de la surface S de la fonction d'appartenance caractérisant l'ensemble flou de conclusion. La figure 5.7 montre clairement cela.

$$Sortie = \frac{\int_S y \cdot \mu(y) \cdot dy}{\int_S \mu(y) \cdot dy} \tag{5.7}$$

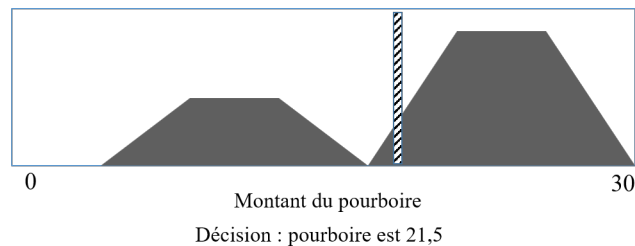


FIGURE 5.7: Méthode de défuzzification avec COG

5.2.7 Système logique floue

Grâce à ces différentes étapes (à savoir la fuzzification, le raisonnement flou et la défuzzification), un système de décision flou (à savoir un système à logique floue) peut être

conçu, comme illustré à la Figure 5.8. Un tel système est utilisé partout : systèmes embarqués automobiles, systèmes autonomes mobiles, systèmes de contrôle d'aéronefs, appareils, systèmes audiovisuels, etc.

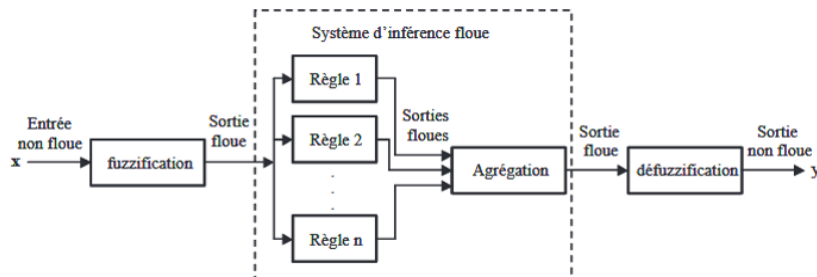


FIGURE 5.8: Système logique floue

5.3 Fuzzy AODV

Pour résoudre le problème de la sélection de route dans le protocole AODV, nous avons introduit trois nouveaux paramètres dans les critères de sélection de route. Les paramètres sélectionnés ont un impact important sur la stabilité des routes, à savoir l'énergie résiduelle, la mobilité du nœud et la distance entre deux nœuds communicants.

Dans [98] [99], les auteurs montrent que la distance entre deux nœuds communicants et leur mobilité peuvent affecter la stabilité de la liaison entre ces nœuds. Ainsi le taux d'erreur de transmission de paquets devient plus élevé si la distance du lien est plus longue, car il s'éloigne de la plage de transmission des nœuds mobiles. Dans ce cas, un petit mouvement de l'un des nœuds impliqués peut entraîner une perte de paquets en raison d'une défaillance de la route.

Comme la liaison a une forte probabilité d'être rompue, si l'un des nœuds intermédiaires a une faible quantité d'énergie [100]. De plus, les paquets sont plus susceptibles d'être perdus en raison de facteurs environnementaux externes comme le bruit et les interférences sans fil si la force du signal n'est pas très forte. Pour cette raison, dans notre approche, nous essayons de prendre en compte ces paramètres pour améliorer les performances du réseau. Pour cela, nous proposons un système qui contient deux systèmes logiques floue figure 5.9. Le premier système FLS1 a trois entrées : le poids (en termes d'énergie) des nœuds traversés par le message de demande de route (RREQ), la distance entre deux nœuds communicants et la variation de la distance entre les nœuds.

FLS1 s'exécute dans chaque nœud intermédiaire qui reçoit le message de demande de route (RREQ). FLS1 calcule et prend des décisions d'adaptation appropriées d'une valeur de stabilité qui mesure la qualité des liens entre la source et le nœud intermédiaire. La deuxième FLS2 prend deux paramètres d'entrée : la stabilité (la sortie de FLS1) et le nombre de saut entre la source et la destination. FLS2 s'exécute seulement dans le nœud de destination. La sortie de FLS2 donne le poids à chaque route disponible, basé sur la stabilité et la longueur de la route. Selon cette valeur, le nœud de destination, sélectionne la bonne route entre les routes disponibles.

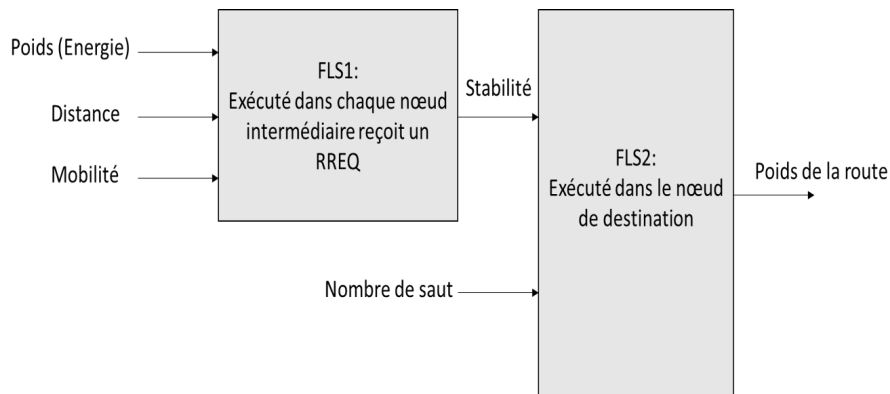


FIGURE 5.9: Système intégré dans l'approche proposée

Dans notre solution proposée on a considéré quelques hypothèses dans le réseau.

- Le réseau n'est pas partitionné.
- Chaque nœud a un lien bidirectionnel avec ses voisins.
- Chaque nœud est capable de calculer la force de signal reçu.

Les nœuds de réseau doivent calculer sont poids en termes d'énergie lorsqu'ils reçoivent un message de demande de route. Cette valeur est obtenue par la division de la durée de vie résiduelle sur le niveau d'énergie restante comme la montre l'équation 4.5 du chapitre précédent.

Pour la distance entre deux nœuds cette valeur peut être prédite en utilisant la force de signal reçu pendant la diffusion de paquet HELLO entre les nœuds. Cette valeur est calculée en utilisant le modèle Two Ray Ground défini dans la couche MAC de ns-2,35.

$$P_r = P_t * G_t * G_r \frac{\lambda^2}{(4 * \pi * d)^2} \quad (5.8)$$

Où

P_r = puissance reçue.

P_t = puissance émise.

G_t = gain d'antenne de l'émetteur.

G_r = gain d'antenne du récepteur.

λ = longueur d'onde.

d = distance.

Dans le contexte réel, il peut ne pas être possible d'obtenir une valeur exacte de la distance physique entre deux nœuds à partir de la force du signal mesuré. Cependant, notre solution ne dépend pas d'une estimation précise des distances entre deux nœuds pour fonctionner correctement.

Plus la force du signal reçu est forte, plus le nœud voisin est proche. Il est important de savoir que la proximité entre deux nœuds n'est pas nécessairement mesurée par leur distance absolue ou physique. Par exemple, un nœud A peut être très proche à un nœud X d'un nœud B (Figure 5.10). Cependant, il manque d'énergie ou qu'il y ait un obstacle entre lui et le nœud X, dans ce cas nœud X aura reçu des paquets à une puissance de signal inférieure de A par rapport B et il va considérer que nœud A est plus loin que B. Par conséquent, X va favoriser le nœud B au lieu de A en terme de distance et ça ce qu'on souhaite. Donc dans notre solution la distance absolue peut ne pas être utile.

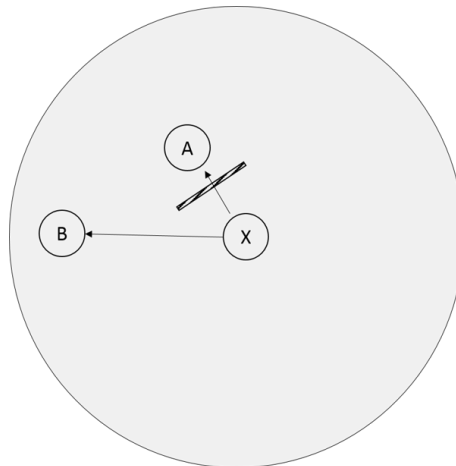


FIGURE 5.10: Distance entre les nœuds

Pour le troisième paramètre d'entrée de notre système flou. Nous mesurons la variation de la distance estimée (en d'autres termes, la variation de la force du signal reçu) entre les

nœuds dans le temps. À partir d'une série de variations de distance, nous utilisons des tests statistiques pour prédire le modèle de mobilité relative entre deux nœuds. Intuitivement nous concluons que deux nœuds sont connectés de façon stable si la force du signal reçu entre eux varie de façon négligeable dans le temps.

Afin d'estimer la mobilité relative entre deux nœuds. Nous calculons la différence de la distance au temps t et $t-1$. La mobilité relative entre deux nœuds indique s'ils s'éloignent l'un de l'autre, s'ils se rapprochent l'un de l'autre ou s'ils maintiennent la même distance.

La mobilité relative de nœud X par rapport au nœud Y en t est calculée comme suit :

$$RM_{XY}^t = ED_{XY}^t - ED_{XY}^{t-1} \quad (5.9)$$

Où ED_{XY}^{t-1} indique la distance estimée entre X et Y .

La variation de la distance est définie comme les changements des distances estimées entre les nœuds. Chaque nœud du réseau a une série de valeurs de distance estimées par rapport à ses voisins, mesurées à un certain intervalle de temps n fois, où $n \leq 10$ [101].

Considérons deux nœuds voisins X et Y . Le nœud X doit avoir une série de valeurs de distance estimée avec le nœud Y dans une période de temps.

Ensuite, le nœud X va calculer le VD_{XY} comme l'écart-type des variations de distance lorsqu'il reçoit le message Route Request (RREQ) comme suit :

$$VD_{XY} = \sigma(|ED_{XY1} - ED_{XY0}|, |ED_{XY2} - ED_{XY0}|, \dots, |ED_{XYn} - ED_{XY0}|) \quad (5.10)$$

Cette procédure sera suivie par le nœud Y et tout nœud du réseau avec ses voisins.

Dans notre solution on a conservé le même nombre de paquets de contrôle utilisé dans le protocole AODV, sauf qu'on a modifié la structure des paquets de demande et de réponse de route (RREQ, RREP). Le nouveau paquet de demande de route va comporter la stabilité des liens entre le nœud intermédiaire actuel et le nœud source. La valeur de stabilité ajoutée dans le paquet sera calculée par notre premier système logique flou. De plus, on a ajouté un champ pour stocker les adresses des nœuds traversés dans les deux paquets RREQ et RREP.

— Découverte de route

Lorsqu'un nœud dans le réseau veut envoyer des données vers un autre nœud dans lequel il ne possède pas de route, il diffuse un paquet de demande de route vers tous ses voisins. Chaque nœud intermédiaire qui reçoit un paquet RREQ va calculer son poids par l'équation 4.5. Si la valeur du poids est inférieure à un seuil donné, le nœud intermédiaire va supprimer le paquet RREQ pour ne pas être parmi les nœuds qui vont participer dans la recherche de la route. Dans le cas contraire, la valeur du poids, la distance et la mobilité relative calculés, seront utilisées comme des paramètres d'entrée pour notre premier système logique flou. La sortie de notre système sera ajoutée dans le paquet RREQ avant la rediffusion de ce paquet. La valeur de sortie représente la stabilité des liens entre le nœud intermédiaire et la source. Contrairement au protocole AODV dans notre approche, un nœud intermédiaire doit rediffuser tous les paquets RREQ reçus. Aussi, si un nœud intermédiaire connaît déjà la route vers le nœud de destination il n'a pas le droit d'envoyer le paquet de réponse de route RREP pour informer le nœud source de la route. Ce processus va se répéter jusqu'à que le nœud de destination reçoive le paquet RREQ.

Cette procédure assurera que le nœud de destination recevra plusieurs paquets RREQ de différentes routes disponibles, avec des nœuds intermédiaires qui ont suffisamment d'énergie.

— Sélection de la route

Dans le protocole AODV si un nœud intermédiaire possède déjà la route vers la destination, ou si la destination elle-même reçoit le paquet RREQ, il envoie immédiatement un paquet RREP vers le nœud source pour l'informer que la route est trouvée et pour commencer le transfert de données. Dans notre solution, seul le nœud de destination a la responsabilité d'envoyer le paquet de réponse de route RREP. Si le nœud de destination reçoit le paquet de demande de route RREQ il attend un certain temps avant d'envoyer le paquet RREP. Ce processus garantit la réception des autres RREQ circulants dans les autres routes.

Lors de la réception de chaque paquet RREQ, le nœud de destination utilise le deuxième système logique flou qui va prendre en paramètre la stabilité des liens stockée dans le paquet et le nombre de saut. La valeur de sortie du système sera stockée jusqu'à l'arrivée des autres paquets RREQ (l'écoulement du temps défini), et il représente le poids de route.

Après l'écoulement du temps défini, le nœud de destination va sélectionner la route la plus stable c'est-à-dire celle qui a une valeur de poids supérieur (sortie de FLS2) avec

un nombre de saut minimal. Ensuite la destination envoie le paquet de réponse de route RREP à travers la route qui est stockée dans le paquet RREQ.

— Maintenance de la route

Dans notre approche la maintenance de route se fait comme dans le protocole AODV. Une route est gardée aussi longtemps qu'elle continue à être active, c'est-à-dire tant que des données transitent entre la source et la destination. La route expire quand il n'y a plus de données en transit sur la route et au bout d'un délai défini dans ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT. En cas de coupure d'un lien entre deux nœuds, le nœud d'extrémité émet un paquet RERR (Route Error) vers le nœud source pour l'informer que la destination est désormais injoignable.

Notre protocole utilise le paquet HELLO pour maintenir les informations de connectivité. Chaque nœud dans le réseau diffuse périodiquement le paquet HELLO pour informer ses voisins qu'il est toujours à portée radio. Ce message est diffusé juste sur les voisins directs. A la réception d'un paquet HELLO, le nœud doit vérifier s'il a une entrée dans sa table de voisinage qui correspond au nœud duquel le message est reçu pour mettre à jour la validité du voisin ; s'il n'existe pas, il le considérera comme un nouveau voisin et il ajoutera son adresse dans sa table de voisinage. Si une entrée dans la table de voisinage expire, le nœud considère que le lien est coupé. Si le nœud source veut toujours obtenir une route vers cette destination, il doit recommencer le processus de découverte de route.

— Notre système logique flou

Notre premier système logique flou s'exécute lorsqu'un nœud intermédiaire reçoit un paquet RREQ. Le mécanisme applique les trois métriques de décision calculées en tant qu'entrées au FLS1 pour démarrer les étapes de la phase de décision. FLS1 fuzzifie les valeurs de l'énergie, la mobilité et la distance en utilisant les fonctions d'appartenance présentées dans les figures 5.11, 5.12, 5.13, 5.14. Dans cette étape, les valeurs calculées sont converties en ensemble flou correspondant (Low, Medium, Height). Ensuite, en utilisant les règles d'interférence décrites dans le tableau 5.2, le FLS1 prend des décisions par la sélection de la règle correspondante. Enfin, une fois que la décision correspondante à la règle est prise, le système va défuzzifier la sortie et donner la valeur obtenue comme résultat.

le deuxième système flou prend comme valeur d'entrée la sortie de FLS1 et le nombre de sauts entre la source et la destination. Les fonctions d'appartenance de ces deux entrées sont présentées dans 5.15 et 5.16. La figure 5.17 représente la fonction d'appartenance de la variable de sortie Poids, et le tableau 5.3 donne les règles floues appliquées par FLS2.

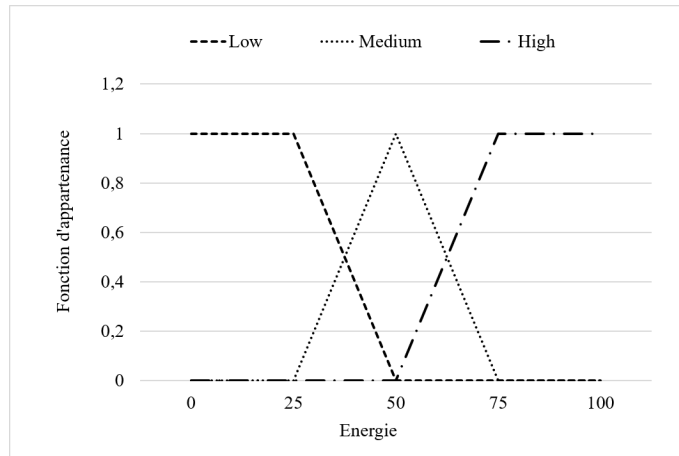


FIGURE 5.11: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée "Energie".

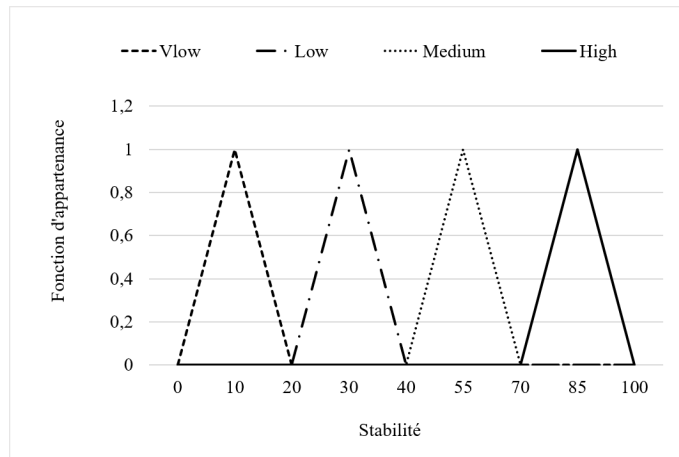


FIGURE 5.12: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée "Distance".

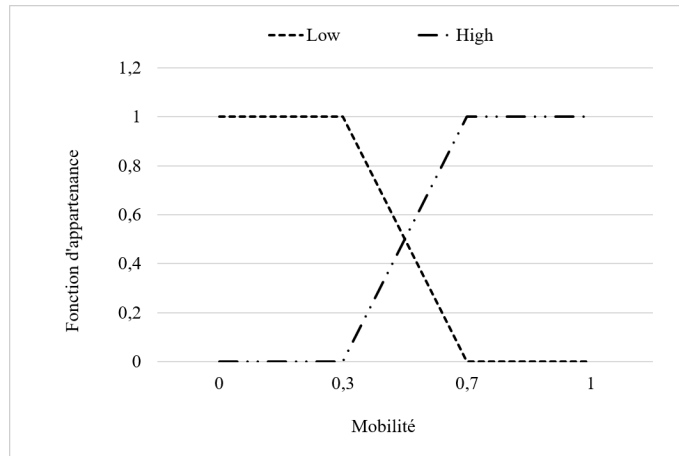


FIGURE 5.13: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée "Mobilité".

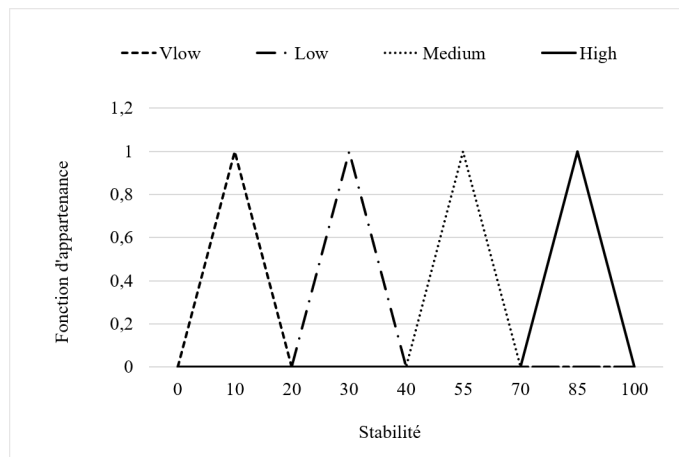


FIGURE 5.14: Fonctions d'appartenance de la variable de sortie "Stabilité".

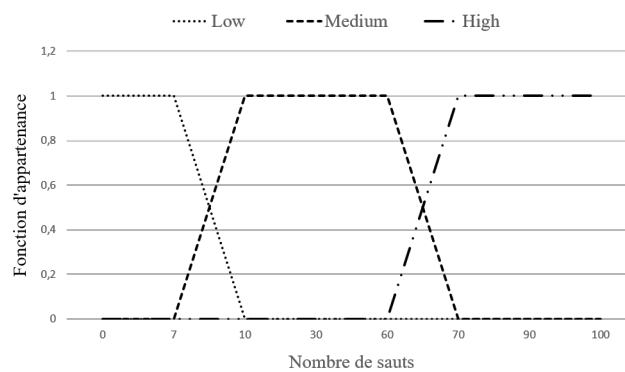


FIGURE 5.15: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée nombre de sauts

Règles	Energie	Distance	Mobilité	Stabilité
1	Low	Near	Low	Low
2	Low	Near	High	VLow
3	Low	Medium	Low	Low
4	Low	Medium	High	VLow
5	Low	Far	Low	VLow
6	Low	Far	High	VLow
7	Medium	Near	Low	Medium
8	Medium	Near	High	Low
9	Medium	Medium	Low	Medium
10	Medium	Medium	High	Medium
11	Medium	Far	Low	High
12	Medium	Far	High	VLow
13	High	Near	Low	High
14	High	Near	High	Medium
15	High	Medium	Low	High
16	High	Medium	High	Medium
17	High	Far	Low	High
18	High	Far	High	Low

Tableau 5.2: Règles floues de FLS1

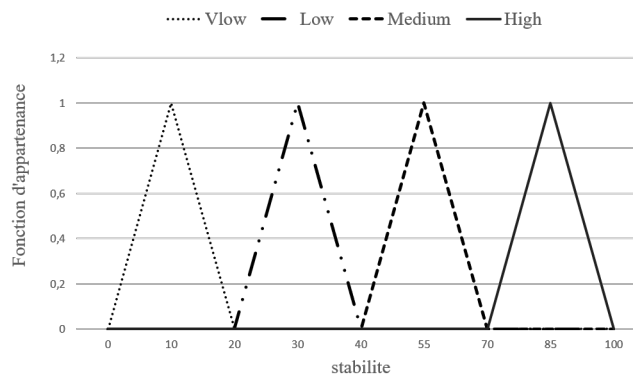


FIGURE 5.16: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée Stabilité

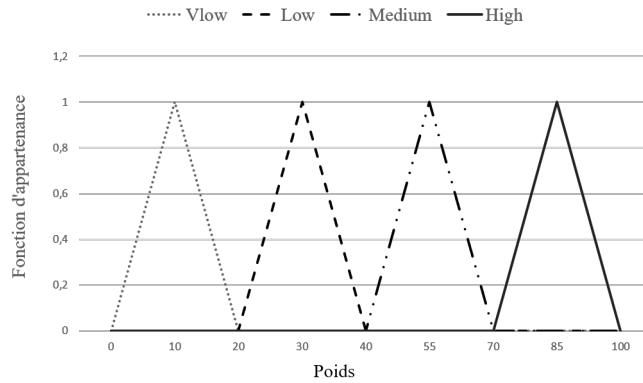


FIGURE 5.17: Fonctions d'appartenance de la variable de sortie Poids

Règles	Stabilité	Nombre de saut	Poids
1	VLow	Low	VLow
2	VLow	Medium	VLow
3	VLow	High	VLow
4	Low	Low	Low
5	Low	Medium	VLow
6	Low	High	VLow
7	Medium	Low	High
8	Medium	Medium	Medium
9	Medium	High	Low
10	High	Low	High
11	High	Medium	Medium
12	High	High	Medium

Tableau 5.3: Règles floues de FLS2

5.4 Simulation et résultats

Les performances de protocole proposé sont évaluées et comparées aux protocoles de base AODV et FuzzyAODV proposés [102]. Le simulateur NS-2 a été utilisé lors de ces simulations. Dans ces simulations, nous considérons que 100 nœuds mobiles se déplacent dans un champ carré de 1000x1000m. La vitesse maximale des nœuds en mouvement est de 5m/s avec un temps de pause égale à 5s et un temps de simulation de 200 secondes.

Chaque point dans le graphe représente la moyenne des résultats de vingt simulations différentes. Chaque exécution est exécutée avec des paires source/destination aléatoires.

Nous avons réalisé plusieurs scénarios en modifiant le nombre de connexions dans le réseau, afin d'évaluer correctement le niveau de qualité de service garanti par le mécanisme proposé. Nous avons choisi comme mesures d'évaluation le taux de paquets délivrés, le délai de bout-en-bout, le taux de paquet de contrôle (charge de routage normalisée), et l'énergie consommée. Le tableau 5.4 récapitule les paramètres généraux utilisés dans la simulation.

Paramètre	Valeur
Topology	1000x1000 m
Number of nodes	100
Mobility model	Random waypoint
MAC layer	IEEE 802.11 DCF
Propagation model	TwoRayGround
Antenna type	Omni directional
Transmission range(m)	20
Simulation time (s)	200
Traffic type	CBR
Packet size (B)	512
Traffic rate (packets/s)	5
Initial energy (Joule)	20-50
Mobile Connection	5-25
MAC Type	Mac/802_11
Interface queue type	Queue/DropTail/PriQueue
Maximum Speed of nodes	5 m/s

Tableau 5.4: Paramètres de simulation.

La figure 5.18 présente la variation du taux de paquets délivrés par rapport à la modification du nombre de connexions dans le réseau. Comme nous pouvons le constater, le taux de paquets délivrés dans les trois protocoles diminue lorsqu'en augmente le nombre de connexions dans le réseau. Le problème est engendré premièrement par l'interférence et aussi par la surcharge du trafic dans certains nœuds du réseau dans le cas du protocole AODV. Nous observons aussi que notre approche peut clairement garder un taux élevé par rapport aux autres protocoles, en particulier lorsque le nombre de connexions augmente. Cette amélioration est due particulièrement à notre approche, qui essaie toujours d'équilibrer la charge entre les nœuds et aussi favoriser les nœuds qui génèrent une durée de vie suffisante.

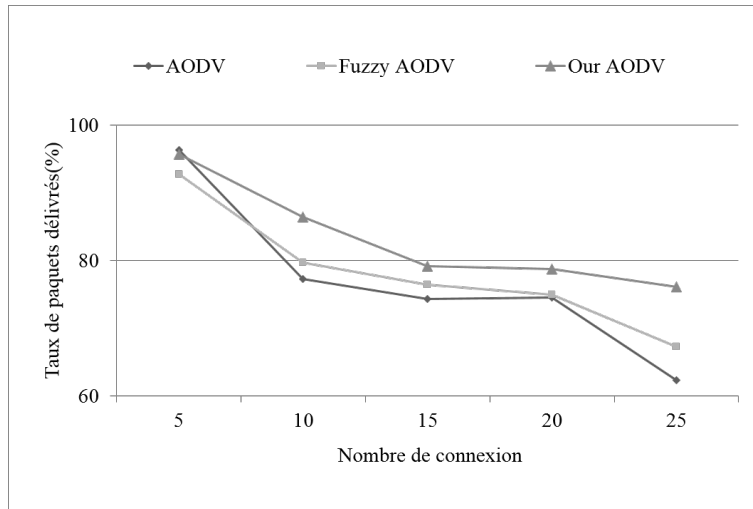


FIGURE 5.18: Taux de paquets livrés par rapport au nombre de connexions

En outre Figure 5.19, montre la charge de routage normalisée qui représente le rapport entre les paquets de contrôle et les paquets des données reçues. Nous observons que le NRL généré par AODV amélioré est inférieur à Fuzzy-AODV par 1% et 4% par rapport au protocole AODV normal, et cela avec 25 connexions. Ces améliorations sont dues à la diminution du nombre de retransmissions des paquets de contrôle (RREP et RREQ) permettant de construire une nouvelle route après la rupture d'une autre, engendrée par la mauvaise sélection des nœuds intermédiaires.

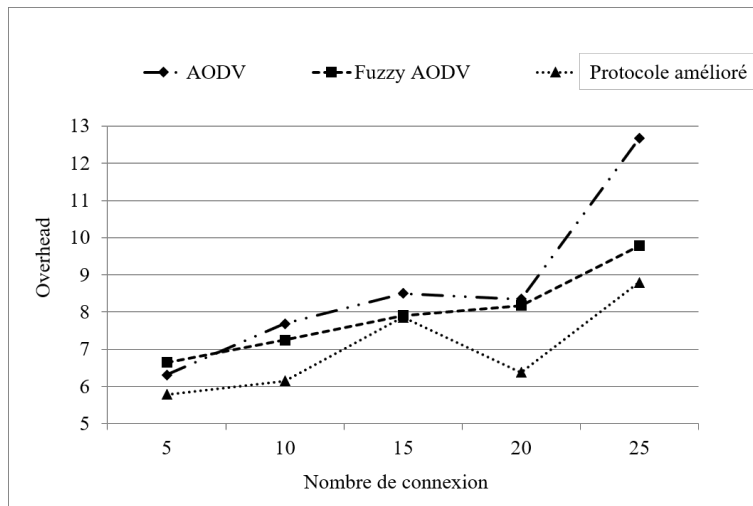


FIGURE 5.19: Le taux de paquets de contrôle par rapport au nombre de connexions

La figure 5.20 illustre le délai moyen de bout en bout. Tous les protocoles ont un délai

de bout en bout plus long avec un nombre élevé de connexions. Principalement à cause des ruptures fréquentes de routes dues à la mort de nœuds intermédiaires et à la mobilité des nœuds. Notre protocole réduit ce problème et fonctionne toujours mieux que AODV et Fuzzy-AODV, même si la charge de trafic augmente. Ceci est dû à notre approche qui réduit le nombre de défaillances des routes, car le temps perdu lors de la reconstruction de la route après la défaillance est éliminé.

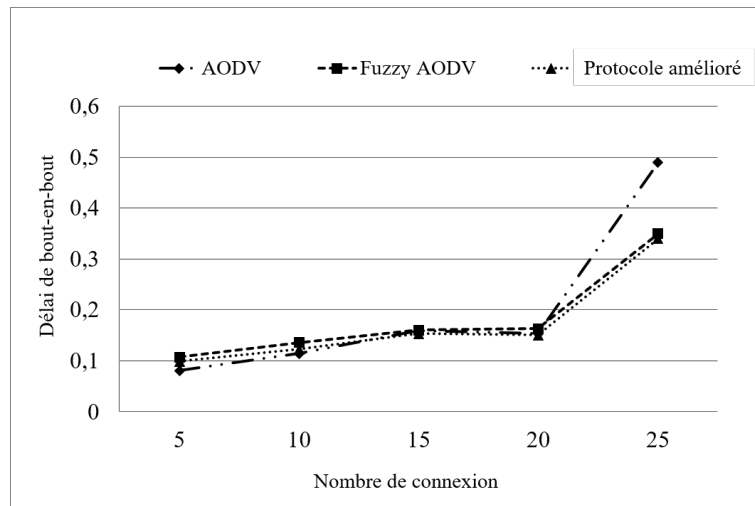


FIGURE 5.20: Délai de bout en bout par rapport au nombre de connexions

Figure 5.21 présente la quantité d'énergie consommée par chaque protocole. La consommation d'énergie augmente respectivement avec l'augmentation du nombre de connexions. Cependant, notre protocole consomme moins d'énergie que les autres et particulièrement lorsque le nombre de connexions dépasse 15 connexions. En effet, notre approche tend à éviter les nœuds intermédiaires à faible énergie lors de la construction des routes. Donc le nombre des routes cassées à cause du manque d'énergie sera réduit, et l'énergie consommée lors de la reconstruction des routes sera gardée. Par conséquent, la durée de vie du réseau sera considérablement améliorée.

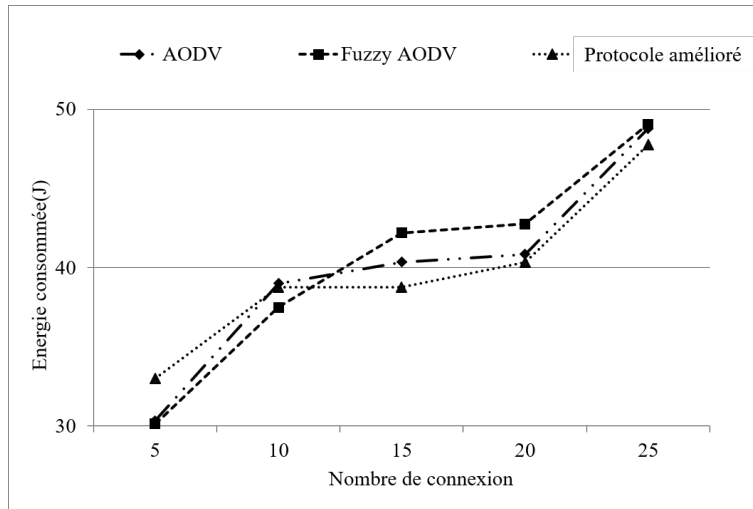


FIGURE 5.21: la consommation d'énergie par rapport au nombre de connexions

5.5 Conclusion

Vu les problèmes auxquels sont confrontés les réseaux mobiles ad-hoc, et en particulier ceux qui utilisent des protocoles de routage réactifs. Nous avons proposé dans ce chapitre, un protocole de routage réactif basé sur le protocole AODV. Dans notre solution, nous avons ajouté trois paramètres parmi les critères de sélection de route de protocole AODV. Ces paramètres ont un impact important sur la stabilité des routes, à savoir l'énergie, la mobilité du nœud et la distance entre deux nœuds communicants.

Nous avons intégré dans notre protocole deux systèmes logique flous. Le premier système combine les trois paramètres ajoutés afin de produire une valeur qui représente la stabilité des liens entre les nœuds intermédiaires et le nœud source. Pour le deuxième système, il s'exécute côté destination et utilise la valeur de stabilité (la sortie du premier système) et le nombre de sauts pour affecter un poids à cette route. Ensuite le nœud de destination va sélectionner une route parmi les routes disponibles selon la valeur du poids obtenue.

À travers les résultats de simulation de cette contribution, nous remarquons que le mécanisme proposé offre des gains en termes de qualité de service et de qualité de trafic. Comme notre protocole donne des résultats suffisants dans différentes métriques comme le taux de paquet délivré, le taux de paquet de contrôle, le délai de bout en bout et la consommation d'énergie par rapport aux protocoles AODV et Fuzzy-AODV, et plus particulièrement dans un réseau avec plus de connexions.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux mobiles Ad hoc sont caractérisés par l'absence d'infrastructure, un support d'énergie limité, et une topologie très dynamique. Ces réseaux sont initialement considérés comme utiles dans plusieurs domaines, tels que les opérations militaires ou les opérations de recherche et de sauvetage. Avec la popularité croissante des applications en temps réel, certains protocoles de routage best effort, proposés précédemment ne permettent pas de prendre en charge la qualité de service (QoS). Par conséquent plusieurs algorithmes de routage ont été proposés afin de solutionner la contrainte de qualité de service pour permettre un large déploiement.

Dans le cadre de cette thèse et afin de proposer un protocole pour améliorer le routage dans les réseaux mobiles Ad hoc, nous avons présenté trois contributions dans lesquelles nous avons principalement abordé le problème ou la contrainte de l'énergie. Comme montré dans le chapitre 3, l'énergie résiduelle des nœuds a un impact direct sur toutes les différentes métriques de qualité de service tels que le taux de paquet de contrôle, le taux de paquet livrée, délai de bout-en-bout, la durée de vie du réseau, etc. Donc un protocole de routage qui prend en considération l'énergie résiduelle des nœuds parmi les critères de sélection des routes sera avantageux en termes de qualité de service.

Dans la première contribution, nous avons étudié la consommation de l'énergie en modifiant certains paramètres du réseau. Cette étude a concerné quatre protocoles AODV, DSR, DSDV et OLSR. Comme prévu, les protocoles réactifs (AODV, DSR) ont montré des meilleures performances par rapport à ceux proactifs (DSDV, OLSR) en terme d'énergie. Ce comportement est justifié par la politique de recherche de route dans chaque catégorie de protocole, puisque dans les protocoles proactifs les nœuds diffusent des paquets de contrôle périodiquement pour trouver les nouvelles routes tandis que dans les protocoles réactifs les nœuds cherchent les routes seulement lorsqu'ils ont des données à envoyer.

Dans la deuxième partie de cette contribution, nous avons concentré nos efforts sur l'impact de l'énergie sur les métriques de qualité de service par l'insertion des nœuds avec une faible quantité d'énergie. D'après les résultats des simulations obtenus, nous avons remarqué que les métriques de qualité de service sont affectés, car ces protocoles au moment de la création des routes se basent seulement sur le nombre de sauts, c'est-à-dire que c'est la route qui contient un nombre de nœuds intermédiaires minimal qui sera choisie. Ce qui conduit dans certains cas à la participation de certains nœuds avec une faible quantité d'énergie dans la construction de la route.

Dans la deuxième contribution, nous avons proposé une stratégie qui vise à prolonger la durée de vie du réseau et d'améliorer les métriques de qualité de service par la modification du mécanisme de recherche de route. Dans le protocole proposé (EE-AODV), nous avons ajouté l'énergie résiduelle comme critère parmi les critères de sélection de la route. Cette technique élimine les nœuds qui ont une faible quantité d'énergie pour ne pas être parmi les nœuds qui vont participer dans le processus d'établissement de la route. Aussi, il permet la distribution du trafic sur un maximum de nœuds du réseau, de telle sorte à avoir un niveau de consommation d'énergie équilibré entre tous les nœuds et ainsi augmenter la durée de vie du réseau. Les différentes simulations montrent que la stratégie proposée le protocole AODV en diminuant le nombre des paquets de contrôle et l'énergie consommée, ainsi il donne un taux de paquets délivrés et une durée de vie améliorés.

Dans la troisième contribution nous avons présenté une amélioration de protocole EE-AODV en ajoutant d'autres paramètres dans le processus de sélection de route. Les paramètres ajoutés sont : la distance entre deux nœuds communicants, la variation de la mobilité des nœuds et le poids de nœud représenté dans la durée de vie restante. Ces paramètres ont un impact sévère sur la stabilité de route. Dans le protocole proposé chaque nœud intermédiaire utilise les paramètres cités et par le biais de la logique floue, le nœud sera capable de calculer la stabilité de la route entre lui et le nœud source. En se basant sur le poids calculé, le nœud intermédiaire décide de rediffuser le paquet de demande de route ou de l'ignorer. La valeur de la stabilité sera ajoutée dans le paquet de demande de route. Ce processus va se répéter jusqu'à ce que le paquet de demande de route atteigne le nœud de destination. En se basant sur la valeur de stabilité et le nombre de sauts de chaque route disponible, le nœud de destination effectue son choix et envoie le paquet RREP dans la route correspondante. Les résultats des simulations effectuées ont montré que l'approche proposée est efficace en termes de différentes métriques de qualité de service, aussi qu'en termes de la quantité d'énergie consommée tout en permettant de garantir la connectivité globale de réseau.

L'orientation future des travaux sera axée sur l'extension des travaux existants et la conception d'une modélisation mathématique plus poussée. Le concept de la théorie des jeux dans les réseaux ad hoc mobiles est devenu une nouvelle tendance en raison de la capacité potentielle de la théorie des jeux à explorer les meilleurs résultats. Cependant, jusqu'à présent, la théorie des jeux n'était que plus encline à résoudre les problèmes de sécurité et de routage. Par conséquent, notre future direction d'étude sera d'explorer la faisabilité de l'application de la théorie des jeux afin d'optimiser le drainage énergétique des nœuds.

Environnement de simulations network simulator 2

A Présentation de Network Simulator 2

Le simulateur NS2 est un simulateur de réseau à événements discrets. Il est populaire dans le monde universitaire pour son extensibilité (en raison de son modèle open source) et sa abondante documentation en ligne. NS2 est couramment utilisé dans la simulation de protocoles de routage et de multidiffusion, entre autres, et est largement utilisé dans la recherche de réseaux ad-hoc. NS2 prend en charge un éventail de protocoles réseau populaires, offrant des résultats de simulation pour les réseaux câblés et sans fil. NS2 est concédé sous licence pour être utilisé sous la version 2 de la licence publique générale GNU.

NS-2 a de nombreuses utilisations en expansion, notamment :

- Évaluer les performances des protocoles de réseau existants.
- Évaluer de nouveaux protocoles de réseau avant utilisation.
- Réaliser des expériences à grande échelle impossibles avec des expériences réelles.
- simuler une variété de réseaux ip

1 Architecture de NS-2

NS2 écrit en C ++, avec un interpréteur OTcl (Object Tool Command Langage) comme interface frontale. Le simulateur supporte une hiérarchie de classes en C ++ et une hiérarchie de classes similaire dans l'interpréteur OTcl. Les deux hiérarchies sont étroitement liées l'une à l'autre. Du point de vue de l'utilisateur, il existe une correspondance individuelle entre une classe de la hiérarchie interprétée et une classe de la hiérarchie compilée. La racine de cette hiérarchie est la classe Objet Tcl. Les utilisateurs créent de nouveaux objets de simulateur via l'interprète ; ces objets sont instanciés dans l'interpréteur et sont étroi-

tement reflétés par un objet correspondant dans la hiérarchie compilée. La hiérarchie de classe interprétée est automatiquement établie à l'aide de méthodes définies dans la classe Tcl Class. Les objets instanciés par l'utilisateur sont reflétés par les méthodes définies dans la classe Tcl Object.

NS2 utilise deux langues parce que le simulateur a deux tâches à effectuer. D'une part, les simulations détaillées de protocoles nécessitent un langage de programmation système capable de manipuler efficacement les octets, les en-têtes de paquets et de mettre en œuvre des algorithmes fonctionnant sur de grands ensembles de données. Pour ces tâches, la vitesse d'exécution est importante et le délai d'exécution moins important. D'autre part, une grande partie de la recherche sur le réseau implique des paramètres ou des configurations légèrement variables, ou une exploration rapide de plusieurs scénarios. Dans ces cas, le temps d'itération est plus important. Comme la configuration s'exécute une seule fois, l'exécution de cette partie de la tâche est moins importante. C++ est rapide à exécuter mais plus lent à changer, ce qui le rend approprié pour une implémentation de protocole détaillée. OTcl fonctionne beaucoup plus lentement, mais peut être modifié très rapidement, ce qui le rend idéal pour la configuration de la simulation.

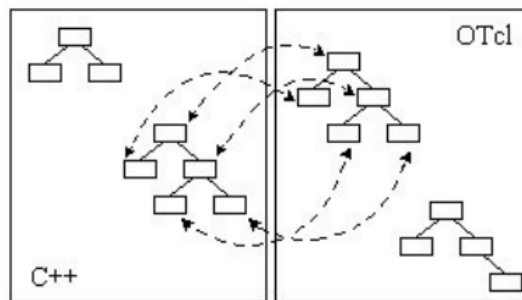


FIGURE A.1: Dualité des classes de NS2

Lorsqu'une simulation est terminée, NS2 génère un ou plusieurs fichiers de sortie textuels contenant des données de simulation détaillées, si cela est spécifié dans le script d'entrée OTcl. Les données peuvent être utilisées pour l'analyse de simulation ou comme entrée dans un outil d'affichage de simulation graphique appelé Network Animator (NAM). NAM possède une interface utilisateur graphique attrayante qui peut présenter graphiquement des informations telles que le débit et le nombre de pertes de paquets à chaque lien, bien que les informations graphiques ne puissent pas être utilisées pour une analyse de simulation précise.

La figure A.3 décrit comment les différentes informations sont stockées dans les différents fichiers du simulateur NS2.

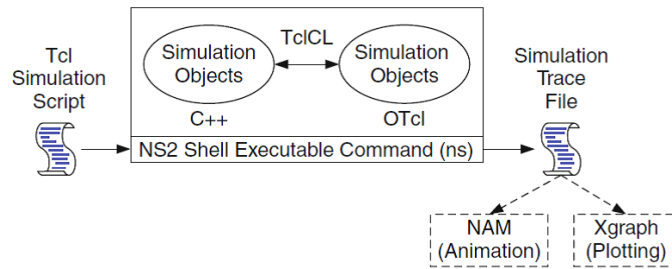


FIGURE A.2: Vue simplifiée de NS2

Parmi les sous-répertoires de ns-allinone-2.35, ns-2 est l'endroit qui contient toutes les implémentations du simulateur, les scripts de test de validation OTcl et des exemples de scripts OTcl. Dans ce répertoire, tous les codes OTcl situés dans un sous-répertoire appelé tcl, ainsi que la plupart du code C++, qui implémente le planificateur d'événements, ainsi que les classes d'objets composant de réseau élémentaire, sont situés au niveau principal.

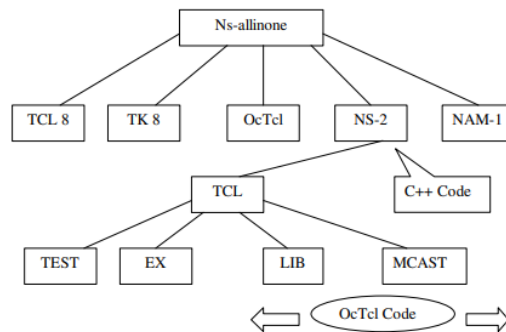


FIGURE A.3: Structure du répertoire de NS2

B Notions de base sur le simulateur

1 Planificateur d'événements

NS2 est un simulateur d'événements. Il y a actuellement quatre planificateurs disponibles dans le simulateur, dont chacun est implémenté en utilisant une structure de données différente : une simple liste liée, un tas, une file d'attente calendrier (par défaut), et un type spécial appelé "temps réel". L'ordonnanceur en temps réel est destiné à l'émulation, ce qui permet au simulateur d'interagir avec un réseau réel. Actuellement, l'émulation est en cours de développement bien qu'une version expérimentale soit disponible. Les planifi-

cateurs d'événements sont utilisés pour planifier des événements tels que quand démarrer un agent cbr, quand envoyer /recevoir/déposer un paquet, etc. Ils sont également utilisés pour simuler le retard.

Les planificateurs d'événements s'exécutent en sélectionnant le prochain événement le plus ancien et en l'exécutant jusqu'à la fin (en appelant les composants réseau appropriés et en leur permettant d'effectuer l'action appropriée associée à l'événement), puis en revenant pour exécuter l'événement suivant. Le simulateur est mono-thread, il n'y a qu'un seul événement en cours d'exécution à un moment donné.

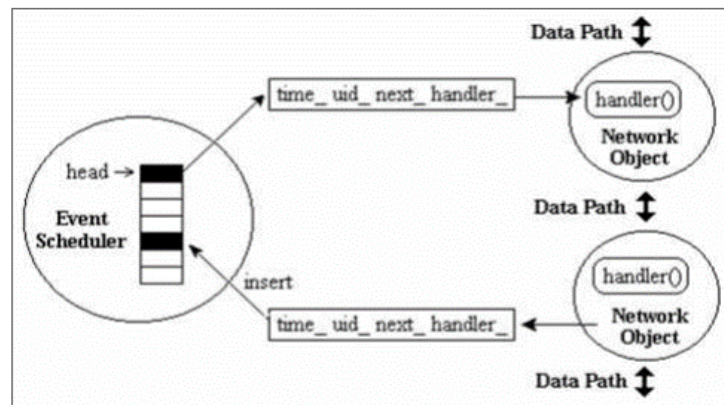


FIGURE A.4: Planificateur d'événements

2 Nœud de base

Un nœud est un objet composé. Il est composé d'un objet d'entrée de nœud et de classificateurs. Il existe deux types de nœuds dans NS. Un nœud unicast a un classificateur d'adresses qui effectue le routage monodiffusion et un classificateur de ports (les agents sont attachés aux ports). En outre, un nœud de multidiffusion possède un classificateur qui classe les paquets de multidiffusion à partir de paquets unicast et un classificateur de multidiffusion qui effectue le routage multicast.

3 Paquet

Les paquets sont les unités fondamentales d'échange entre les objets. Un paquet est composé d'une pile d'en-têtes et d'un espace de données facultatif.

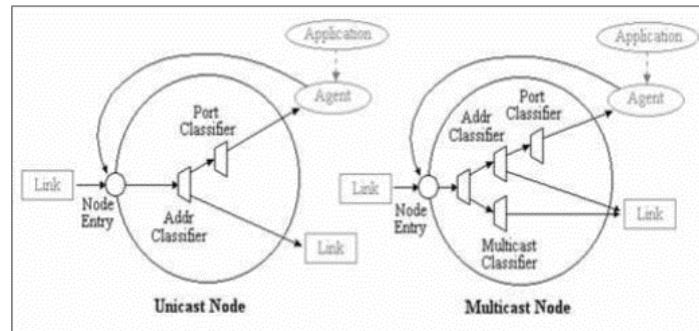


FIGURE A.5: Structure de base du nœud dans NS2

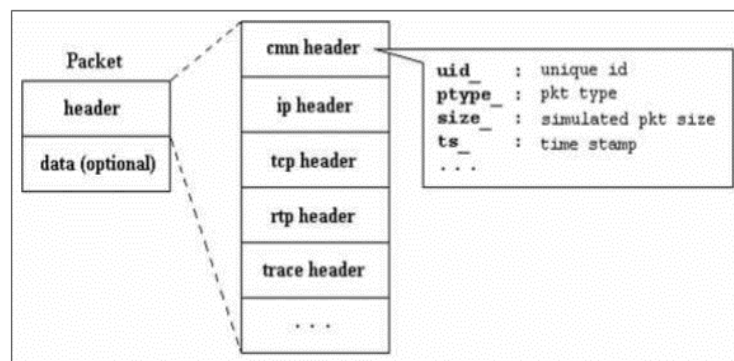


FIGURE A.6: Lien simplex

Chaque en-tête de la pile correspond à une couche particulière. De plus, il existe un en-tête commun auquel toutes les couches peuvent accéder, ainsi qu'un en-tête de trace contenant des informations pour le support de trace. Les nouveaux protocoles peuvent définir leurs propres en-têtes de paquet ou étendre les en-têtes existants avec des champs supplémentaires.

4 Agent

Les agents sont utilisés dans la mise en œuvre de protocoles à différentes couches. Ils représentent des points d'extrémité où des paquets de couche réseau sont construits ou utilisés. Il existe plusieurs types d'agents pris en charge par NS2 au niveau de la couche de transport. Network Simulator dispose également d'agents de routage implémentant les différents protocoles de routage tels que DSDV, TORA, AODV et DSR.

Ci-dessous des exemples des agents au niveau de la couche de transport :

- Agent TCP : pour émettre un trafic TCP.
- Agent UDP : pour émettre un trafic UDP.
- Agent TCPSink : pour la réception du trafic TCP.
- Agent NULL : pour la réception des paquets UDP.

Bibliographie

- [1] Brooke SHRADER. « A proposed definition of ‘Ad hoc network’ ». In : *Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden* (2002).
- [2] Norman ABRAMSON. « THE ALOHA SYSTEM : another alternative for computer communications ». In : *Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference*. ACM. 1970, p. 281-285.
- [3] Norman ABRAMSON. « Development of the ALOHANET ». In : *IEEE transactions on Information Theory* 31.2 (1985), p. 119-123.
- [4] M SCHWARTZ et N ABRAMSON. « The Alohanet-surfing for wireless data [History of Communications] ». In : *IEEE Communications Magazine* 47.12 (2009), p. 21-25.
- [5] Stefano BASAGNI et al. *Mobile ad hoc networking : Cutting edge directions*. T. 35. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] Shimin GUO et al. « Design and implementation of the KioskNet system ». In : *Computer Networks* 55.1 (2011), p. 264-281.
- [7] Avri DORIA, Maria UDEN et Durga Prasad PANDEY. « Providing connectivity to the saami nomadic community ». In : *International Conference on Open Collaborative Design for Sustainable Innovation : 01/12/2002-02/12/2002*. 2002.
- [8] John B KENNEY. « Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States ». In : *Proceedings of the IEEE* 99.7 (2011), p. 1162-1182.
- [9] Min CHEN et al. « Body area networks : A survey ». In : *Mobile networks and applications* 16.2 (2011), p. 171-193.
- [10] Steve DITLEA. « The PC goes ready-to-wear ». In : *IEEE spectrum* 37.10 (2000), p. 34-39.
- [11] Emil JOVANOVIĆ et Aleksandar MILENKOVIĆ. « Body area networks for ubiquitous healthcare applications : opportunities and challenges ». In : *Journal of medical systems* 35.5 (2011), p. 1245-1254.
- [12] Emil JOVANOVIĆ et al. « A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation ». In : *Journal of NeuroEngineering and rehabilitation* 2.1 (2005), p. 6.
- [13] Chris OTTO et al. « System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring ». In : *Journal of mobile multimedia* 1.4 (2006), p. 307-326.

- [14] Hans SCHAFFERS et al. « Smart cities and the future internet : Towards cooperation frameworks for open innovation ». In : *The future internet assembly*. Springer. 2011, p. 431-446.
- [15] Suha ALAWADHI et al. « Building understanding of smart city initiatives ». In : *International conference on electronic government*. Springer. 2012, p. 40-53.
- [16] Vassilis KOSTAKOS, Timo OJALA et Tomi JUNTUNEN. « Traffic in the smart city : Exploring city-wide sensing for traffic control center augmentation ». In : *IEEE Internet Computing* 17.6 (2013), p. 22-29.
- [17] Xiaoyan HONG, Kaixin XU et Mario GERLA. « Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks ». In : *IEEE network* 16.4 (2002), p. 11-21.
- [18] Elizabeth M ROYER et Chai-Keong TOH. « A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks ». In : *IEEE personal communications* 6.2 (1999), p. 46-55.
- [19] Jean-Marc PERCHER et Bernard JOUGA. « Détection d'intrusions dans les réseaux Ad hoc ». In : *Projet* (2003).
- [20] Dominique DHOUTAUT. « Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation ». In : *Laboratoire CITI, INSA de Lyon* 11 (2003).
- [21] Pau ARCE VILA. « Hierarchical routing and cross-layer mechanisms for improving video streaming quality of service over mobile wireless ad hoc networks ». Thèse de doct. Editorial Universitat Politècnica de València, 2014.
- [22] Ching-Chuan CHIANG et al. « Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel ». In : *proceedings of IEEE SICON*. T. 97. 1997. 1997, p. 197-211.
- [23] Zehua WANG, Yuanzhu CHEN et Cheng LI. « PSR : A lightweight proactive source routing protocol for mobile ad hoc networks ». In : *IEEE transactions on Vehicular Technology* 63.2 (2013), p. 859-868.
- [24] ZJ HAAS et MR PEARLMAN. « The Zone Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks ». In : *draft-ietf-manet-zone-zrp-02. txt, IETF : The Internet Engineering Task Force, July* (2000).
- [25] Mingliang JIANG. « Cluster Based Routing Protocol (CBRP)(INTERNET-DRAFT draft-ietf-manet-cbrp-spec-01. txt) ». In : *National University of Singapore* (1999), p. 1-27.

- [26] Charles E PERKINS et Pravin BHAGWAT. « Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers ». In : *ACM SIGCOMM computer communication review*. T. 24. 4. ACM. 1994, p. 234-244.
- [27] Thomas CLAUSEN et Philippe JACQUET. « Rfc3626 : Optimized link state routing protocol (olsr) ». In : *Experimental*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt> 51 (2003).
- [28] Philippe JACQUET et al. « Optimized link state routing protocol for ad hoc networks ». In : *Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001*. IEEE. 2001, p. 62-68.
- [29] Amir QAYYUM, Laurent VIENNOT et Anis LAOUITI. « Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks ». In : *Proceedings of the 35th annual Hawaii international conference on system sciences*. IEEE. 2002, p. 3866-3875.
- [30] David B JOHNSON et David A MALTZ. « Dynamic source routing in ad hoc wireless networks ». In : *Mobile computing*. Springer, 1996, p. 153-181.
- [31] David JOHNSON, Yin-chun HU et David MALTZ. *The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4*. Rapp. tech. 2007.
- [32] Giuseppe BIANCHI. « Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function ». In : *IEEE Journal on selected areas in communications* 18.3 (2000), p. 535-547.
- [33] Marco FOTINO et al. « Evaluating energy consumption of proactive and reactive routing protocols in a MANET ». In : *IFIP Conference on Wireless Sensor and Actor Networks*. Springer. 2007, p. 119-130.
- [34] CK NAGPAL et al. « Impact of variable transmission range on MANET performance ». In : *International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing* 2.4 (2011), p. 59.
- [35] Aqeel TAHA et al. « Energy efficient multipath routing protocol for mobile ad-hoc network using the fitness function ». In : *IEEE access* 5 (2017), p. 10369-10381.
- [36] Jipeng ZHOU et al. « Ant colony-based energy control routing protocol for mobile ad hoc networks under different node mobility models ». In : *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2016.1 (2016), p. 105.
- [37] Houarri MAOUCHI. « Routage avec Qualité de Service dans AODV ». In : *Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, mémoire présenté pour obtenir le titre d'ingénieur* (2009).

- [38] Kui WU, Janelle HARMS et al. « QoS support in mobile ad hoc networks ». In : *Crossing Boundaries-the GSA Journal of University of Alberta* 1.1 (2001), p. 92-106.
- [39] Racha Ben ALI et Samuel PIERRE. « An efficient predictive admission control policy for heterogenous wireless bandwidth allocation in next generation mobile networks ». In : *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*. ACM. 2006, p. 635-640.
- [40] Simon SAUNDERS et Alejandro ARAGÓN-ZAVALA. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [41] Robert BRADEN, David CLARK et Scott SHENKER. *Integrated services in the internet architecture : an overview*. Rapp. tech. 1994.
- [42] Steven BLAKE et al. *An architecture for differentiated services*. Rapp. tech. 1998.
- [43] Gahng-Seop AHN et al. « SWAN : Service differentiation in stateless wireless ad hoc networks ». In : *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. T. 2. IEEE. 2002, p. 457-466.
- [44] Hannan XIAO et al. « A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks ». In : *VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37026)*. T. 1. IEEE. 2000, p. 445-449.
- [45] Kai CHEN, Samarth H SHAH et Klara NAHRSTEDT. « Cross-layer design for data accessibility in mobile ad hoc networks ». In : *Wireless Personal Communications* 21.1 (2002), p. 49-76.
- [46] Xiao YANG, Chen HUI et Li Frank HAIZHON. *Handbook of security and networks*. World Scientific, 2011.
- [47] DENG DR-JIUNN et CHANG RUAY-SHIUNG. « A Priority Scheme for IEEE 802.11 DCF Access Method ». In : *IEICE transactions on communications* 82.1 (1999), p. 96-102.
- [48] Imad AAD et Claude CASTELLUCCIA. « Differentiation mechanisms for IEEE 802.11 ». In : *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No. 01CH37213)*. T. 1. IEEE. 2001, p. 209-218.
- [49] Nitin VAIDYA et al. « Distributed fair scheduling in a wireless LAN ». In : *IEEE Transactions on Mobile Computing* 4.6 (2005), p. 616-629.
- [50] Joao L SOBRINHO et Anjur Sundaresan KRISHNAKUMAR. « Real-time traffic over the IEEE 802.11 medium access control layer ». In : *Bell labs technical Journal* 1.2 (1996), p. 172-187.

- [51] Imad AAD et Claude CASTELLUCCIA. « Remarks on per-flow differentiation in IEEE 802.11 ». In : *Proc. of European Wireless*. T. 2002. Citeseer. 2002.
- [52] Imad AAD et Claude CASTELLUCCIA. « Priorities in wlans ». In : *Computer networks* 41.4 (2003), p. 505-526.
- [53] Stefan MANGOLD et al. « IEEE 802.11 e Wireless LAN for Quality of Service ». In : *Proc. European Wireless*. T. 2. 2002, p. 32-39.
- [54] Seoung-Bum LEE et al. « INSIGNIA : An IP-based quality of service framework for mobile ad hoc networks ». In : *Journal of Parallel and distributed Computing* 60.4 (2000), p. 374-406.
- [55] Seon Yeong HAN, Byoungheon SHIN et Dongman LEE. « An application-driven path discovery mechanism for MANET routing protocols ». In : *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. 2014, p. 2822-2827.
- [56] Prasun SINHA, Raghupathy SIVAKUMAR et Vaduvur BHARGHAVAN. « CEDAR : A core-extraction distributed ad hoc routing algorithm ». In : *IEEE INFOCOM'99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No. 99CH36320)*. T. 1. IEEE. 1999, p. 202-209.
- [57] S VENKATASUBRAMANIAN et NP GOPALAN. « A QoS-based robust multipath routing protocol for mobile ad hoc networks ». In : *2009 First Asian Himalayas International Conference on Internet*. IEEE. 2009, p. 1-7.
- [58] Latif Ullah KHAN et al. « M-AODV : Modified Ad Hoc On-demand distance vector routing scheme ». In : *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*. IEEE. 2014, p. 18-22.
- [59] Jipeng ZHOU et al. « A QoS routing protocol with bandwidth allocation in multichannel ad hoc networks ». In : *Wireless personal communications* 75.1 (2014), p. 273-291.
- [60] Yihai ZHANG et T Aaron GULLIVER. « Quality of service for ad hoc on-demand distance vector routing ». In : *WiMob'2005), IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005*. T. 3. IEEE. 2005, p. 192-196.
- [61] Lei CHEN et Wendi B HEINZELMAN. « QoS-aware routing based on bandwidth estimation for mobile ad hoc networks ». In : *IEEE Journal on selected areas in communications* 23.3 (2005), p. 561-572.

- [62] Wilder E CASTELLANOS, Juan C GUERRI et Pau ARCE. « A QoS-aware routing protocol with adaptive feedback scheme for video streaming for mobile networks ». In : *Computer Communications* 77 (2016), p. 10-25.
- [63] Piyush GUPTA et Panganmala R KUMAR. « The capacity of wireless networks ». In : *IEEE Transactions on information theory* 46.2 (2000), p. 388-404.
- [64] Yurong CHEN, Emin Gün SIRER et Stephen B WICKER. « On selection of optimal transmission power for ad hoc networks ». In : *36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. Proceedings of the*. IEEE. 2003, 10-pp.
- [65] Swetha NARAYANASWAMY et al. « Power control in ad-hoc networks : Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol ». In : *European wireless conference*. T. 2002. Florence, Italy. 2002, p. 156162.
- [66] Wing Ho YUEN et Chi Wan SUNG. « On energy efficiency and network connectivity of mobile ad hoc networks ». In : *23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings*. IEEE. 2003, p. 38-45.
- [67] Martin BURKHART et al. « Does topology control reduce interference? » In : *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. ACM. 2004, p. 9-19.
- [68] Javier GOMEZ et al. « Conserving transmission power in wireless ad hoc networks ». In : *Proceedings Ninth International Conference on Network Protocols. ICNP 2001*. IEEE. 2001, p. 24-34.
- [69] Michael B PURSLEY, Harlan B RUSSELL et Jeffrey S WYSOCARSKI. « Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios ». In : *IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhanced Public Safety and Security (Cat. No. 00EX405)*. IEEE. 2000, p. 1-5.
- [70] Eun-Sun JUNG et Nitin H VAIDYA. « A power control MAC protocol for ad hoc networks ». In : *Wireless Networks* 11.1-2 (2005), p. 55-66.
- [71] Kuei-Ping SHIH et Yen-Da CHEN. « CAPC : A collision avoidance power control MAC protocol for wireless ad hoc networks ». In : *IEEE Communications Letters* 9.9 (2005), p. 859-861.
- [72] Vikas KAWADIA et al. « Protocols for media access control and power control in wireless networks ». In : *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. T. 2. IEEE. 2001, p. 1935-1940.

- [73] Alexandre Andrade PIRES, José Ferreira DE REZENDE et Carlos CORDEIRO. « ALCA : A new scheme for power control on 802.11 ad hoc networks ». In : *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks*. IEEE. 2005, p. 475-477.
- [74] Christine E JONES et al. « A survey of energy efficient network protocols for wireless networks ». In : *wireless networks 7.4* (2001), p. 343-358.
- [75] Daquan FENG et al. « A survey of energy-efficient wireless communications ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials 15.1* (2012), p. 167-178.
- [76] Geoffrey Ye LI et al. « Energy-efficient wireless communications : tutorial, survey, and open issues ». In : *IEEE Wireless Communications 18.6* (2011), p. 28-35.
- [77] Sheetakumar DOSHI et Timothy X BROWN. « Minimum energy routing schemes for a wireless ad hoc network ». In : *IEEE INFOCOM*. T. 2. 2002, p. 1.
- [78] Suresh SINGH, Mike WOO et Cauligi S RAGHAVENDRA. « Power-aware routing in mobile ad hoc networks ». In : *MobiCom*. T. 98. 1998, p. 181-190.
- [79] Sunsook JUNG, Nisar HUNDEWALE et Alex ZELIKOVSKY. « Energy efficiency of load balancing in MANET routing protocols ». In : *Sixth International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing and First ACIS International Workshop on Self-Assembling Wireless Network*. IEEE. 2005, p. 476-483.
- [80] C-K TOH. « Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks ». In : *IEEE communications Magazine 39.6* (2001), p. 138-147.
- [81] Morteza MALEKI, Karthik DANTU et Massoud PEDRAM. « Power-aware source routing protocol for mobile ad hoc networks ». In : *Proceedings of the 2002 international symposium on Low power electronics and design*. ACM. 2002, p. 72-75.
- [82] Wendi Rabiner HEINZELMAN, Anantha CHANDRAKASAN et Hari BALAKRISHNAN. « Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks ». In : *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*. IEEE. 2000, 10-pp.
- [83] Suman BANERJEE et Archan MISRA. « Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks ». In : *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*. ACM. 2002, p. 146-156.

- [84] Laura Marie FEENEY et Martin NILSSON. « Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment ». In : *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No. 01CH37213)*. T. 3. IEEE. 2001, p. 1548-1557.
- [85] Rong ZHENG et Robin KRAVETS. « On-demand power management for ad hoc networks ». In : *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428)*. T. 1. IEEE. 2003, p. 481-491.
- [86] Daji QIAO et Kang G SHIN. « Smart power-saving mode for IEEE 802.11 wireless LANs ». In : *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. T. 3. IEEE. 2005, p. 1573-1583.
- [87] G RAVI et KR KASHWAN. « A new routing protocol for energy efficient mobile applications for ad hoc networks ». In : *Computers & Electrical Engineering* 48 (2015), p. 77-85.
- [88] Ya XU, John HEIDEMANN et Deborah ESTRIN. « Geography-informed energy conservation for ad hoc routing ». In : *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM. 2001, p. 70-84.
- [89] Gin-Xian KOK et al. « EAOMDV-MIMC : A multipath routing protocol for multi-interface multi-channel mobile ad-hoc networks ». In : *Wireless personal communications* 73.3 (2013), p. 477-504.
- [90] Teerawat ISSARIYAKUL et Ekram HOSSAIN. « Introduction to Network Simulator 2 (NS2) ». In : *Introduction to network simulator NS2*. Springer, 2009, p. 1-18.
- [91] J-C CANO et Pietro MANZONI. « A performance comparison of energy consumption for mobile ad hoc network routing protocols ». In : *Proceedings 8th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (Cat. No. PR00728)*. IEEE. 2000, p. 57-64.
- [92] Kevin FALL, Kannan VARADHAN et al. « The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation) ». In : *The VINT project* 47 (2005), p. 19-231.
- [93] Anshuman BISWAS, Banani SAHA et Saswati GUHA. « Performance analysis of AODV and DSR routing protocols for ad-hoc networks ». In : *International Conference on Advanced Computing, Networking and Security*. Springer. 2011, p. 297-305.
- [94] Sofiane HAMRIOUI et Pascal LORENZ. « EQ-AODV : Energy and QoS supported AODV for better performance in WMSNs ». In : *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. 2016, p. 1-6.

- [95] Elizabeth M ROYER et Charles E PERKINS. « Ad-hoc on-demand distance vector routing ». In : *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. T. 2. 1999, p. 90-100.
- [96] Charles PERKINS, Elizabeth BELDING-ROYER et Samir DAS. *Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing*. Rapp. tech. 2003.
- [97] Lotfi A ZADEH. « Fuzzy sets ». In : *Information and control* 8.3 (1965), p. 338-353.
- [98] Nityananda SARMA et Sukumar NANDI. « Route stability based qos routing in mobile ad hoc networks ». In : *Wireless Personal Communications* 54.1 (2010), p. 203-224.
- [99] Moustafa YOUSSEF et al. « Routing metrics of cognitive radio networks : A survey ». In : *IEEE communications surveys & tutorials* 16.1 (2013), p. 92-109.
- [100] Marco FOTINO et Floriano DE RANGO. « Energy issues and energy aware routing in wireless ad hoc networks ». In : *Mobile ad-hoc networks : Protocol design*. intechopen, 2011.
- [101] Inn Inn ER et Winston Khoon Guan SEAH. « Mobility-based d-hop clustering algorithm for mobile ad hoc networks ». In : *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No. 04TH8733)*. T. 4. IEEE. 2004, p. 2359-2364.
- [102] Nihad I ABBAS, Mustafa ILKAN et Emre OZEN. « Fuzzy approach to improving route stability of the AODV routing protocol ». In : *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2015.1 (2015), p. 235.

Liste des Publications

Articles

1. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hassan FAOUZI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA. (2017). Enhancing Energy Efficiency of Reactive Routing Protocol in Mobile Ad-Hoc Network with Prediction on Energy Consumption. International Arab Journal of Information Technology (IAJIT) (pp. 1-7)
2. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hassan FAOUZI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA. (2017) A Fuzzy-Based Routing Strategy to Improve Route Stability in MANET Based on AODV. In : El Abbadi A., Garbinato B. (eds) Networked Systems. NETYS 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10299. Springer, Cham
3. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hassan FAOUZI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA. Improving Performance of Mobile Ad Hoc Network Using Clustering Schemes, The International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT) Vol. 6, No. 2, August 2017, pp. 69-75.

Conférences internationales

1. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hassan FAOUZI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA. (2019). A Balanced Energy Consumption in Mobile Ad hoc Network. Procedia Computer Science, 151, 1182-1187.
2. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hassan FAOUZI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA, " Improving Performance of Mobile Ad Hoc Network Using Clustering schemes ", The Third International Conference on Business Intelligence (CBI'17), March 29-31, 2017, Beni Mellal, Morocco.
3. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA, "An Energy Consumption Evaluation of Reactive and Proactive Routing

Protocols in Mobile Ad-Hoc Network," 2016 13th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGiV), Beni Mellal, Morocco, 2016, pp. 437-441. IEEE.

4. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hassan FAOUZI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA, "Energy Enhancement Of Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol for Maximum Lifetime in MANET", The International Arab Conference on Information Technology (ACIT'16), December 6-8, 2016, Beni Mellal, Morocco.
5. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA, " Performance Comparison of DSDV, AODV and DSR Routing Protocols for MANETS", First International Conference on business Intelligence (CBI'14), April 30, 2014, Beni Mellal , Morocco.
6. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA. (2014). A Survey on QoS Enhancements in AODV protocol for MANET. INTIS'2014, 13.
7. **Mohamed ER-ROUIDI**, Houda MOUDNI, Hicham MOUNCIF, Abdelkrim MERBOUHA. (2019). A Balanced Energy Consumption in Mobile Ad hoc Network. Procedia Computer Science (Elsevier) (pp. 1182–1187)